



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VYUŽITÍ MODERNÍCH NUMERICKÝCH METOD
PŘI NÁVRHU SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ

USING MODERN NUMERICAL METHODS IN DESIGN OF LOW VOLTAGE CIRCUIT
BREAKERS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš Dostál

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc.

BRNO 2018

Abstrakt

Dizertační práce je zaměřena na efektivní využití numerických metod při vývoji spínacích přístrojů nízkého napětí, jmenovitě na vytvoření fyzikálně korektního a spolehlivého numerického modelu teplotního pole, který najde uplatnění při návrhu proudovodné dráhy přístroje pro různé provozní stavy. Vytvoření numerického modelu vyžaduje nejen správné zahrnutí všech možností přenosu tepla – vedení, proudění a záření, ale i správné vyřešení problematiky přechodového odporu – jak elektrického, tak tepelného u elektrických kontaktů v různém stupni opotřebení. Proto nezbytnou část dizertační práce tvoří i důkladná experimentální analýza potřebných materiálových vlastností a závislostí, které tvoří vstupní údaje pro numerický model založený na metodě konečných objemů. Poslední část práce se zabývá odlaďováním a verifikací numerického modelu, aby souhlasil s experimentálně získanými daty. Výsledkem práce je numerický model, který je schopen správně řešit jak ustálené, tak různé přechodné stavy spínacího přístroje.

Abstract

The theses is focused on efficient use of numerical methods in development of low-voltage switching devices, namely to create a physically correct and reliable numerical model of the temperature field to find an application in the design of the current path of a device for various operating conditions. The creation of this numerical model requires not only correct inclusion of all modes of heat transfer - conduction, convection and radiation, but also correct solution of problematic transient resistance - both electrical and thermal in electrical contacts at different stages of usage. Therefore an essential part of the theses forms a thorough experimental analysis of the necessary material properties and dependencies which forms input data for the numerical model that is based on the finite volume method. The last part of the theses deals with debugging and verification of numerical model to correspond with experimentally obtained data. The result of the theses is the numerical model which is able to solve correctly both steady and various transient states of swiching devices.

Klíčová slova

jistič; kompaktní jistič; oteplení; přetížení; metoda konečných objemů; spínací přístroje nízkého napětí

Keywords

circuit breaker; molded case circuit breaker; temperature rise; overload; finite volume method; low voltage switchgear

Bibliografická citace

DOSTÁL, L. *VYUŽITÍ MODERNÍCH NUMERICKÝCH METOD PŘI NÁVRHU SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 104 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou dizertační práci s názvem „Využití moderních numerických metod při návrhu spínacích přístrojů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dizertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. RNDr. Vladimíru Aubrechtovi, CSc za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé doktorské práce. Dále bych rád poděkoval za pomoc a spolupráci svým kolegům, především Jiřímu Valentovi za odborné konzultace. V poslední řadě pak děkuji za podporu svým blízkým a rodině.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	7
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A CÍLŮ PRÁCE	8
2.1 STANOVENÉ POŽADAVKY	8
2.2 CÍLE PRÁCE	8
3 REŠERŠE SOUVISEJÍCÍ S PROBLEMATIKOU.....	10
3.1 POŽADAVKY VYPLÝVAJÍCÍ ZE SILOVÉHO ELEKTRICKÉHO ROZVODU	10
3.1.1 FUNKCE A TECHNOLOGIE JISTICÍCH PŘÍSTROJŮ	11
3.2 VÝKONOVÝ JISTIČ.....	12
3.2.1 JEDNOKONTAKTNÍ SPÍNACÍ SYSTÉM S TMTU	13
3.2.2 DVOU- A VÍCEKONTAKTNÍ SPÍNACÍ SYSTÉM S TMTU	14
3.2.3 POLOVODIČOVÝ JISTIČ.....	16
3.3 ODPOR KONTAKTŮ.....	17
3.4 PŘENOS TEPLA	18
3.4.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY	19
3.4.2 ROVNICE VEDENÍ TEPLA	19
3.4.3 ROVNICE VEDENÍ A PROUDĚNÍ TEPLA.....	21
3.5 POČÍTAČOVÁ DYNAMIKA TEKUTIN.....	22
3.6 SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	22
3.7 VSTUPNÍ DATA PRO NUMERICKÝ VÝPOČET	23
3.7.1 PŘECHODOVÝ ODPOR KONTAKTNÍHO STYKU	23
4 ZJEDNODUŠENÝ JEDNOPÓLOVÝ MODEL.....	26
4.1 TVORBA MODELU A SIMULACE USTÁLENÉHO STAVU	26
4.2 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH SAD SILOVÝCH KONTAKTŮ V USTÁLENÉM STAVU	29
4.3 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH KOMPONENTŮ V USTÁLENÉM STAVU.....	30
4.4 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH KOMPONENTŮ PŘI PŘETÍŽENÍ	34
5 MĚŘENÍ OTEPLENÍ VÝKONOVÉHO JISTIČE.....	38
5.1 INSTALACE TERMOČLÁNKU	39
5.2 METODIKA ZKOUŠENÍ PODLE NORMY ČSN	43
5.2.1 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA PŘÍSTROJE PŘED INSTALACÍ TERMOČLÁNKŮ	46
5.2.2 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA PŘÍSTROJE PO INSTALACI TERMOČLÁNKŮ	47
6 TŘÍPÓLOVÝ NUMERICKÝ MODEL VÝKONOVÉHO JISTIČE	52
6.1 TVORBA MODELU A SIMULACE USTÁLENÉHO STAVU	53
6.1.1 NUMERICKÝ VÝPOČET USTÁLENÉHO STAVU	57
6.1.2 POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO MODELU V USTÁLENÉM STAVU S LABORATORNÍM MĚŘENÍM ...	59
6.1.3 VLIV PŘECHODOVÉHO ODPORU SILOVÝCH KONTAKTŮ NA OTEPLENÍ PŘÍSTROJE.....	61
6.1.4 MODIFIKACE TEPELNÉ SPOUŠTĚ PŘÍSTROJE A VLIV NA OTEPLENÍ	63
6.2 SIMULACE PŘETÍŽENÍ	66

6.3 MĚŘENÍ PŘETÍŽENÍ A OVĚŘENÍ NUMERICKÉHO MODELU PŘÍSTROJE.....	68
7 SHRUTÍ POZNATKŮ NUMERICKÉHO MODELU.....	72
8 ZÁVĚR.....	75
LITERATURA	77
PŘÍLOHA A ZJEDNODUŠENÝ MODEL SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE.....	80
USTÁLENÝ STAV – POROVNÁNÍ SILOVÝCH KONTAKTŮ	80
USTÁLENÝ STAV – POROVNÁNÍ KONTAKTNÍHO RAMÍNKY.....	81
PŘETÍŽENÍ – POROVNÁNÍ MODELU V0.1 A V1.1.....	83
PŘÍLOHA B LABORATORNÍ MĚŘENÍ OTEPLENÍ	89
PŘÍLOHA C PLNOHODNOTNÝ 3F MODEL JISTIČE.....	91
USTÁLENÝ STAV - SIMULACE $0,7 \times I_N$	91
USTÁLENÝ STAV - SIMULACE $0,8 \times I_N$	92
USTÁLENÝ STAV - SIMULACE $1,18 \times I_N$	93
USTÁLENÝ STAV - SIMULACE $1,3 \times I_N$	94
USTÁLENÝ STAV - SIMULACE $1,0 \times I_N$ – ZÁMĚNA TOPÍTKA	95
USTÁLENÝ STAV - SIMULACE RŮZNÉHO PŘECHODOVÉHO ODPORU SILOVÝCH KONTAKTŮ	96
PŘETÍŽENÍ – POROVNÁNÍ SIMULACE S FYZICKÝM MĚŘENÍM PŘI $4 \times - 12 \times I_N$	97

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Příklad ukončení distribuční sítě v ČR od 110 kV [14].</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2: Zjednodušené schéma obvyklé struktury rozvodu [5].</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 3: Jednokontaktní spínací systém výkonového jističe BC 160A [17].</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 4: Termomagnetická spoušť jističe BC 160A [17].</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 5: Dvoukontaktní systém výkonového jističe (US Patent No. US8159319) [3].</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 6: Čtyřkontaktní spínací systém výkonového jističe (US Patent No. US8350168) [4].</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 7: Polovodičový výkonový jistič se jmenovitou hodnotou 100 A [25].</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 8: Styčné plochy kontaktů [20].</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 9: Element pro analýzu vedení tepla v tělese.</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 10: Vliv přitlačné síly na kontaktní styk, 3 různé sady kontaktů.</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 11: Ověření stálosti kontaktního styku pro různé přitlačné síly, 1. sada, 250 operací ...</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 12: Jednopolový model spínacího přístroje uložený v pólkazetě.</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 13: Zjednodušený jednofázový (1f) model jističe.</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 14: Rozložení teplotního pole modelu V0.1, 250 A.</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 15: Rozložení teploty na zjednodušeném modelu V0.1 včetně proudnic, 250 A – řez.</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 16: Poloha měřicích bodů MP na proudové dráze přístroje.</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 17: Porovnání numerického modelu pro různé varianty silových kontaktů – ustálený stav.</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 18: Porovnání numerických modelů pro různé varianty kontaktního ramínka – ustálený stav.</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 19: Rozložení teploty na zjednodušeném modelu V1.1 včetně proudnic, 250 A – řez.</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 20: Porovnání oteplení proudových drah modelů verze V1.0 a V1.1, 250 A.</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 21: Oteplovací křivka modelu V0.1 při přetížení $10 \times I_n$.</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 22: Oteplovací křivka měřicího bodu MP 05 pro různé verze modelů při $10 \times I_n$.</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 23: Studie oteplení topítka modelu V1.1.- $10 \times I_n$ v čase 5 s.</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 24: Základní zapojení termočlásku.</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 25: Umístění termočlásku, které je shodné s měřicími body v numerickém výpočtu.</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 26: Instalace termočlásku na kontaktní páku jističe</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 27: Instalace termočlásku na nosič pevného kontaktu (vlevo přívod a vpravo vývod). ..</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 28: Instalace termočlásku - pohled na celou sestavu pól kazety - prostřední pól.</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 29: Instalace termočlásku na přívodní svorku L1 a L2 (linde side).</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 30: Instalace termočlásku na vývodní svorku spouště jističe včetně detailu zafixování termočlásku.</i>	<i>42</i>

Obrázek 31: Instalace termočlánků na topítka spouště (vlevo na přívodní pas, vpravo na patu bimetalu).....	43
Obrázek 32: Umístění měřicích bodů oteplení pro nový jistič.....	46
Obrázek 33: Umístění všech měřicích bodů pro instalaci termočlánků.	48
Obrázek 34: Naměřené hodnoty oteplení při teplotě okolí ~23-28 °C pro různé provozní stavy I_n	50
Obrázek 35: Upravený model 3f jističe pro simulaci.....	52
Obrázek 36: Popis oblastí pro aplikaci přechodového odporu (elektrický i tepelný).....	54
Obrázek 37: Nevyhovující rozložení sítě buněk při jemnosti kroku 4/8.	55
Obrázek 38: Vhodnější rozložení sítě buněk numerického modelu.	55
Obrázek 39: Porovnání tvorby sítě před (vlevo) a po (vpravo) manuálním nastavení podmínek.	56
Obrázek 40: Ustálený stav modelu 250 A, řez L2 – teplota [°C].....	57
Obrázek 41: Ustálený stav modelu 250 A, řez L2 – úbytek napětí [mV].	57
Obrázek 42: Ustálený stav modelu 250 A, řez L2 – rozložení hustoty proudu [A/m^2].	58
Obrázek 43: Ustálený stav modelu 250 A, detailní studie topítka (Rozložení proudové hustoty - vlevo a Teplotní profil - vpravo).....	58
Obrázek 44: Ustálený stav modelu 250 A, teplotní profil bimetalu prostředního pólu.	59
Obrázek 45: Graf naměřených a vypočítaných hodnot oteplení na prostředním pólu jističe při různých stavech zatížení.	60
Obrázek 46: Vliv přechodového odporu silových kontaktů na teplotní profil přístroje při 250 A.	62
Obrázek 47: Ustálený stav modelu při přechodovém elektrickém odporu 120 %, 250 A, řez L2.	62
Obrázek 48: Teplotní profil proudové dráhy přístroje pro různé verze topítka tepelné spouště.	64
Obrázek 49: Ustálený stav modelu s topítkem č. 3, 250A, řez L2.	64
Obrázek 50: Rozložení teploty pro různé verze topítka.....	65
Obrázek 51: Upadnutý pohyblivý kontakt jističe po dosažení teploty > 600 °C.....	66
Obrázek 52: Numerický model přetížení při $10 \times I_n$	67
Obrázek 53: Teplotní profil pohyblivého kontaktu na straně vývodu bod MP 06; 4 - $12 \times I_n$ - L2.	68
Obrázek 54: Měření přetížení při $4 \times$, $6 \times$, $8 \times$, $10 \times$ a $12 \times$ jmenovité hodnoty proudu spínacího přístroje.	69
Obrázek 55: Záznam teploty na pohyblivých kontaktech přístroje při přetížení $4 \times I_n$	69
Obrázek 56: Záznam teploty na pohyblivých kontaktech přístroje při přetížení $12 \times I_n$	70
Obrázek 57: Fyzický stav topítka po zkoušce přetížení, $14 \times I_n$	70
Obrázek 58: Grafické porovnání časů obou vzorků při kritické teplotě na pohyblivém kontaktu.	73

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Požadované vlastnosti jističů.</i>	12
<i>Tabulka 2: Verze modelů s různým kontaktním ramínkem – porovnání.</i>	31
<i>Tabulka 3: Verze modelů s různým nosičem pevného kontaktu - porovnání</i>	33
<i>Tabulka 4: Porovnání modelů proudové dráhy jističe se jmenovitým zatížením 250 A.</i>	36
<i>Tabulka 5: Měřicí rozsah termočlánků.</i>	39
<i>Tabulka 6: Mezní hodnota oteplení svorek podle všeobecné normy ČSN EN 60947-1.</i>	45
<i>Tabulka 7: Mezní hodnoty oteplení přístupných částí podle všeobecné normy ČSN EN 60947-1.</i>	46
<i>Tabulka 8: Oteplovací zkouška jističe – nový jistič 250 A.</i>	47
<i>Tabulka 9: Oteplení jističe 250 A po instalaci termočlánků.</i>	48
<i>Tabulka 10: Požadované hodnoty proudu pro měření ustáleného stavu.</i>	50
<i>Tabulka 11: Porovnání numerického modelu a laboratorního měření přístroje</i>	71
<i>Tabulka 12: Nastavené vypínací časy tepelné spouště.</i>	71
<i>Tabulka 13: Dosažení kritické hodnoty 500 °C na pohyblivém kontaktu přístroje na vzorku č. 1.</i>	72
<i>Tabulka 14: Dosažení kritické hodnoty 500 °C na pohyblivém kontaktu přístroje na vzorku č. 2.</i>	73
<i>Tabulka 15: Dosažení kritické hodnoty 500 °C na pohyblivém kontaktu (simulace / dodatečné měření na dalších vzorcích)</i>	74

SEZNAM ZKRATEK

ACB	-	Air Circuit Breaker
MCB	-	Miniature Circuit Breaker
MCCB	-	Molded Case Circuit Breaker
CAD	-	Computer Aided Design
CAE	-	Computer Aided Engineering
CFD	-	Computational Fluid Dynamics
NPZ	-	Newtonovy pohybové zákony
TMTU	-	Thermal-Magnetic Tripping Unit
EN	-	Evropská norma
UL	-	Underwriters Laboratories

1 ÚVOD

Elektrické přístroje nalézají uplatnění v celé energetické soustavě – od výroby, přes přenos a rozvod energie až k její spotřebě. Tyto přístroje vykonávají v soustavě různé funkce – např. spojují a rozpojují obvody, zapínají a vypínají proud v obvodu, jistí elektrický obvod atd. Důležitou funkcí elektrického přístroje v obvodu je také ochrana člověka nebo domácích zvířat před úrazem elektrickým proudem.

Důležitou skupinou elektrických přístrojů jsou výkonové spínací přístroje. Hlavní funkcí výkonového spínacího přístroje je spínání v provozním a poruchovém stavu, včetně zkratu. V oblasti nízkého napětí zastupuje tuto funkci jistič, který připojuje elektrický obvod do rozvodné sítě a samočinně (prostřednictvím spouště působící na zámek volnoběžky) vypíná i nadproudy až do meze svých vypínacích schopností.

Moderní výkonové (zejména kompaktní) jističe využívají kontaktní systém založený na rotačním pohybu hlavního páru kontaktů z důvodu vyšší vypínací schopnosti přístroje. K přerušení proudové dráhy dojde vlivem rotace kontaktního systému na dvou místech. Tento systém musí být doplněn spínacím systémem, na který působí spouště. Nejlépe vybavené jističe obsahují elektronické spouště, kde analýzu protékajícího proudu obstarává řídicí obvod s Rogowského cívkou a pro rychlé rozpojení kontaktů může být doplněn o tlakovou spoušť. Cena těchto elektronických spouští je bohužel vysoká, a i přes jejich nespornou výhodu připojit tento přístroj pomocí moderní datové komunikace do řídicích a monitorujících nadřazených systémů, je zde stále vysoká poptávka po jednoduchosti a hlavně nízké výrobní ceně, která nutí výrobce použít i starší a hlavně jednodušší (a tedy i spolehlivější) termomagnetické spouště.

Při samotném vývoji jisticího přístroje lze využít zavedený postup konstruktérů, kdy nakreslený model se nechá vyrobit a následně je v laboratoři podroben zkouškám. Tento postup se opakuje do té doby, dokud nejsou všechny problémy přístroje vyřešeny. Avšak s moderní dobou CAD modelů lze využít i počítačové programy k usnadnění inženýrské analýzy (CAE - Computer Aided Enginerring) s nespočetnou výhodou úspory času a financí.

Cílem této práce je ukázat, že při vývoji nového jisticího přístroje nízkého napětí lze využít nástroje CAE se zaměřením na výpočetní dynamiku tekutin (CFD – Computational Fluid Dynamics), a urychlit tak vývoj dílčích částí proudové dráhy jističe pro různé provozní stavy a přetížení.

Výsledky získané z moderního programu SolidWorks Flow simulation využívajícího metodu konečných objemů dokázaly, že použití CAE softwaru může ušetřit peníze a zkrátit čas potřebný pro vývoj nového přístroje.

Tato práce vznikla ve spolupráci a za pomoci vývojového oddělení Siemens (OEZ). Výsledky dizertační práce naleznou uplatnění v dalším vývoji přístrojů u této společnosti.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A CÍLŮ PRÁCE

2.1 Stanovené požadavky

Na základě studia a analýzy nároků, jež jsou kladeny na elektrické přístroje nízkého napětí podle normy ČSN EN 60947-1 ed.4: Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 1: všeobecná ustanovení [1] (dále jen jako všeobecná norma) a normy ČSN EN 60947-2 ed.3: Spínací a řídicí přístroje nn – Část 2: Jističe [2] (dále jen jako normy), musí přístroje navržené podle numerických modelů vyhovět těmto vybraným bodům z hlediska oteplení:

- *Zkouška oteplení* podle článku normy 8.3.2.5 Typové zkoušky.
- *Prověření oteplení* podle článku 8.3.3.6 ve Zkušebním sledu I: Všeobecné provozní vlastnosti.
- *Prověření oteplení* podle článku 8.3.4.4 ve Zkušebním sledu II: Jmenovitá provozní vypínací schopnost.
- Prověření oteplení proudové dráhy při zapůsobení tepelné spouště přístroje při přetížení.

Numerický model musí samozřejmě respektovat i požadavek na minimální výrobní náklady.

2.2 Cíle práce

Koncepčním cílem dizertační práce je vytvořit spolehlivý a dostatečně přesný numerický model tepelného pole elektrického přístroje v simulačním prostředí SolidWorks Flow Simulation, který by reagoval na různé provozní stavy přístroje včetně opotřebení kontaktů v průběhu životnosti přístroje.

Hlavní cíl této práce lze rozdělit na několik dílčích etap:

- Rešerše související s problematikou oteplení a požadavků kladených normou.
- Experimentální získání potřebných vstupních dat pro numerický model.
- Vytvoření funkčního jednopólového numerického modelu proudové dráhy.
- Ověření správnosti numerických výpočtů laboratorním měřením na vyrobeném funkčním vzorku.
- Vytvoření třípólového numerického modelu jističe s originální geometrií pro všechny použité části jističe.
- Provedení numerických výpočtů pro různé provozní stavy jističe, včetně eroze kontaktů a diskuze získaných výsledků.

Model přístroje splňující požadavky na *zkoušku oteplení* podle článku normy 8.3.2.5 Typové zkoušky a vyhovující cenové politice zadavatele se vyrobí a laboratorně ověří. Tento prototyp, po dodatečných úpravách, které vzejdou z dalšího laboratorního měření a numerických výpočtů, musí splňovat veškeré požadavky na něj kladené pro získání protokolu o Typové zkoušce přístroje a certifikátu pro uvedení na trh.

Dále se práce zaměří na porovnání oteplení různých konstrukčních řešení proudové dráhy. Na vybrané vyhovující geometrii se poté upraví okrajové podmínky numerického výpočtu z podkladů získaných z laboratorních měření. Následně se vytvoří teplotní profil přístroje v závislosti na různých hodnotách přechodového odporu kontaktního systému jističe. Nestálost přechodového odporu na kontaktech jističe je totiž způsobena jak vlastním složením kontaktů, tak i vrstvami

nečistot, které se na nich usazují při jeho provozování. Pro jednoduší stanovení oteplení na kritických místech spínacího systému geometrie při známém oteplení svorek jističe se vypracuje přehledný graf.

Posledním cílem práce je porovnání vytvořených modelů s reálnými funkčními vzorky, které splňují veškeré zkoušky, jež jsou vypsány v Kapitole 2.1: *Stanovené požadavky*. Neboť pouze přístroj, který vyhoví všem požadavkům normy, tj. splněním typových zkoušek, může být uveden na trh, čímž končí proces vývoje daného zařízení. Dalším krokem může být proces optimalizace výrobních nákladů, ale to už není náplní této práce.

3 REŠERŠE SOUVISEJÍCÍ S PROBLEMATIKOU

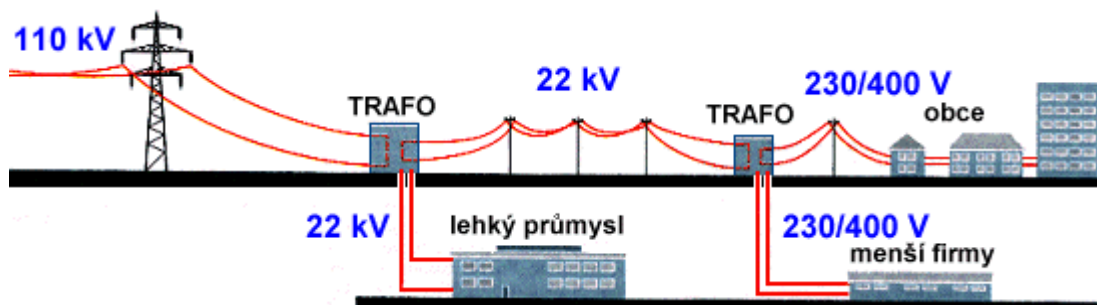
3.1 Požadavky vyplývající ze silového elektrického rozvodu

Elektrická energie je pro svoji univerzálnost a jednoduchou distribuci dobře využitelná pro přeměnu na jiné druhy energií např.:

- Elektrická (transformátory, usměrňovače, měniče atd.)
- Mechanická (elektromotory)
- Teplo (tepelné spotřebiče, chladničky, mrazicí technika)
- Chemická (galvanické články, elektrolyza)
- Zářivá (výbojky a žárovky)

Pro eliminaci vlastních ztrát v přenosové a distribuční soustavě je zapotřebí transformovat elektrickou energii vyrobenou v elektrárnách na hodnotu velmi vysokého napětí (v ČR nejčastěji 110 a 220 kV). Delší vedení využívá i zvláště vysoké napětí 400 kV. Pro další potlačení vlastních ztrát na vedení je výhodné využívat ještě vyšší hodnotu napětí. Zde již bohužel vzniká tak vysoké elektrické pole kolem vodičů, že na hrotech a okolo vodičů vzniká korona. Ta, zejména za vlhkého počasí, způsobuje sršení, a tím tak zvyšuje elektrické ztráty vedení. Neméně podstatnou finanční částí je použití odolnějších izolátorů a komplikovanějších stožárů.

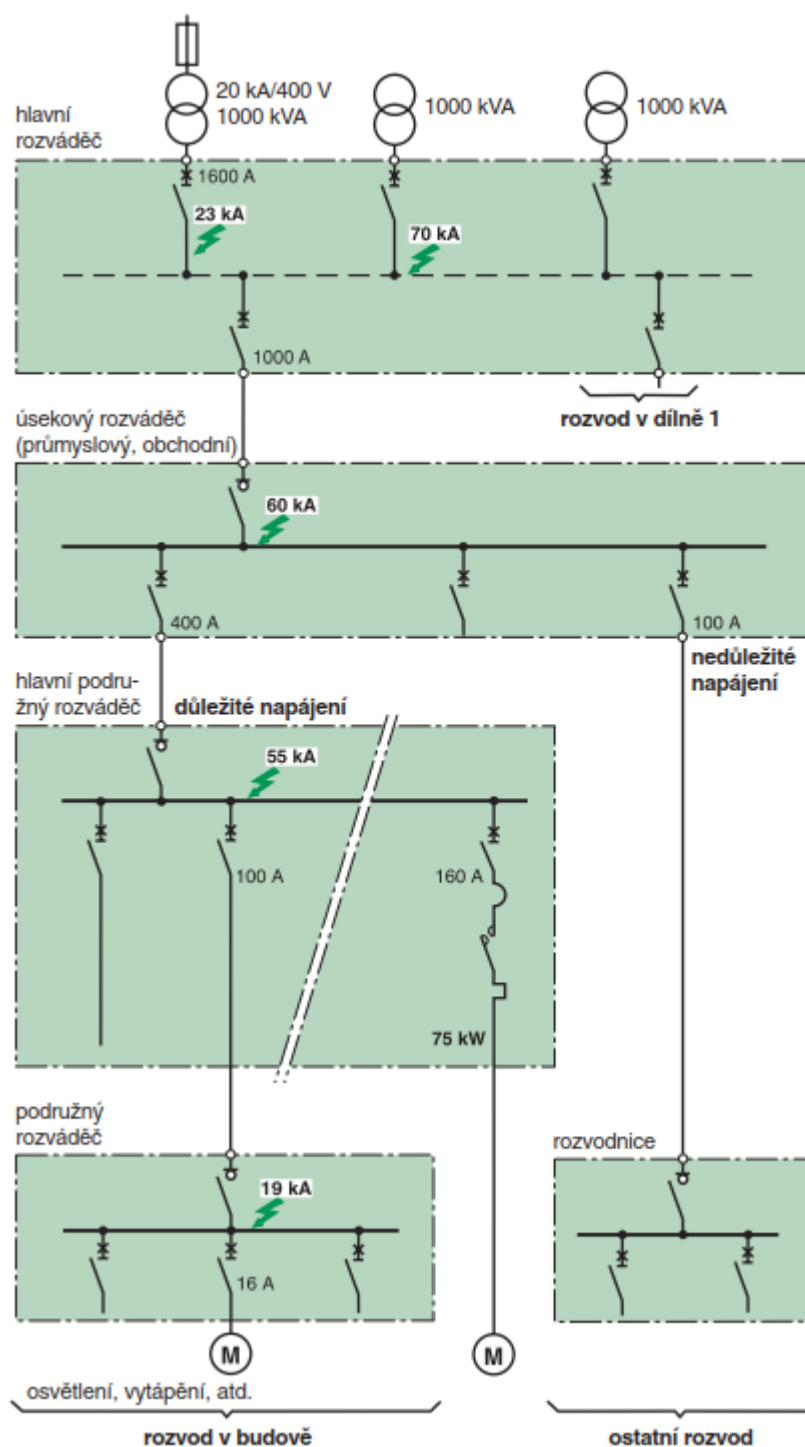
V transformační stanici se velmi vysoké či zvláště vysoké napětí, transformované přímo v elektrárně, transformuje na vysoké napětí 110 kV a část elektrické energie se přivádí do velkých podniků těžkého průmyslu a do měníren zajišťujících napájení elektrifikovaných železničních tratí. Zbývající část se distribuuje k dalším spotřebitelům (lehký průmysl, města, obce), kde se transformuje na napětí 22 kV. K poslední transformaci na nízké napětí 230/400 V nebo 690 V dochází v samotných podnicích, obcích a městských čtvrtích, jako je zobrazeno na Obrázku 1.



Obrázek 1: Příklad ukončení distribuční sítě v ČR od 110 kV[14].

Hlavní elektrický rozvod nízkého napětí pro lehký průmysl je standardně napojován na transformátor 22/0,42 kV s výkonem do 2,5 MVA. Z tohoto důvodu se celý silový elektrický rozvod nn navrhuje tak, aby dokázal odolat různě vysokým zkratovým proudům, které zde mohou vzniknout. Obvykle se tento silový rozvod nízkého napětí dělí na tři základní úrovně:

- **Úroveň A** - Hlavní a úsekové rozvaděče (vybaven ACB nebo MCCB)
- **Úroveň B** - Hlavní podružný rozvaděč (vybaven nejčastěji MCCB)
- **Úroveň C** - Podružný rozvaděč (vybaven MCCB nebo MCB)



Obrázek 2: Zjednodušené schéma obvyklé struktury rozvodu [5].

3.1.1 Funkce a technologie jisticích přístrojů

Tyto typy spínacích přístrojů jsou schopny zapnout a vypnout proud tekoucí elektrickým obvodem až do své zapínací a vypínací schopnosti, a proto jejich obvyklou funkcí je:

- zapnutí obvodu,
- vedení proudu,
- vypnutí obvodu a přerušení proudu včetně automatického vypnutí při nadproudu,

- ochrana osob před úrazem elektrickým proudem v rámci ochranného opatření automatické odpojení od zdroje,
- spolehlivé odpojení.

Požadavky vyplývající z potřeb instalace, optimalizace ceny, zajištění spolehlivosti a bezpečnosti napájení jsou podkladem pro různé technické možnosti řešení jističů. Jsou přehledně znázorněny v následující tabulce:

Tabulka 1: Požadované vlastnosti jističů.

	Úroveň		
	A	B	C
typ jističe	ACB	MCCB	MCB i MCCB
požadavek	přenos vysokých pracovních proudů	často přerušení proudu co nejrychleji, a tedy omezení zkratového proudu => silové a tepelné namáhání vodičů	zajištění selektivity s podřazenými jisticími přístroji, omezení zkratového proudu => silové a tepelné namáhání vodičů a spotřebičů
umístění	obvykle do přívodů a vývodů hlavních rozvaděčů	střední část elektrické instalace	vývody na spotřebič
vlastnost přístroje	neomezující jistič	omezující nebo neomezující jistič	omezující jistič
vypínací schopnost Icu	40 - 150 kA	36 - 150 kA	obvykle nepřekračující 20 kA
jmenovitý proud	1000 - 6300 A	100 až 1600 A	1,5 – 125 A
kategorie užití	B	A pro $I_r < 630$ A obvykle B pro $I_r > 630$ A	A
výdržný proud	40-100 kA / 1s	nevyžadováno pro kategorii užití A	nevyžadováno pro kategorii užití A
přípojnícový systém	Cu - přípojnice	CU - přípojnice / kabel	kabely

Poznámka k tabulce 1: Instalované jisticí přístroje na úrovni C musí zajistit:

- omezení poruchových proudů,
- pohodlí pro uživatele,
- naprostou bezpečnost (obsluha osobami bez elektrické kvalifikace).

3.2 Výkonový jistič

Jistič je ochranný vypínací přístroj, který umí bezpečně vypnout provozní proudy, a samočinně proudy při přetížení a zkratech. Vypíná při poruše v kterékoli ze tří fází, a to současně všechny tři, čím zabrání běhu trojfázového přístroje jenom na dvě fáze. Tepelná a elektromagnetická spoušť se

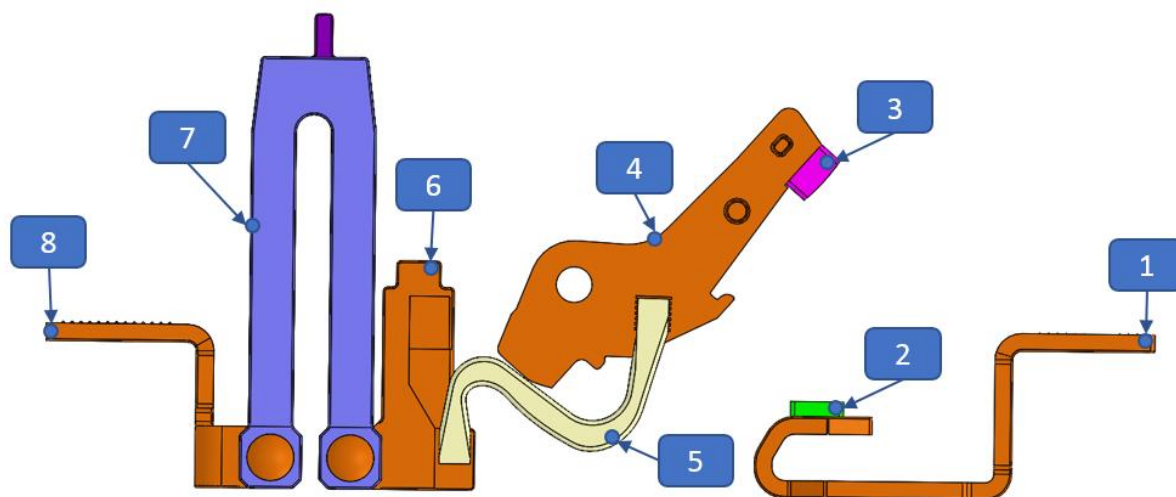
nastavují odděleně. Tím je možné docílit selektivity vzhledem k jističům, které jsou zařazeny před i za jističem. Reakční doba mechanismu se při zkratu pohybuje obvykle mezi 3 – 4 ms.

Revolucí kompaktních jističů v oblasti vývoje byla 90. léta 20. století. Dosažení maximální variability se stavebnicovou konstrukcí umožnilo výměnu nebo doplnění příslušenství přímo v místě instalace. Kromě těchto konstrukčních vylepšení se sepsaly podklady nově vznikající normy pro spínací a řídicí přístroje nízkého napětí ČSN EN 60947-2 ed. 1; Část 2: Jističe.

V následujících podkapitolách jsou popsána základní konstrukční řešení kontaktního systému, která výrazně ovlivňují parametry přístroje.

3.2.1 Jednokontaktní spínací systém s TMTU

Obvyklé konstrukční řešení jednokontaktního spínacího systému kompaktního jističe využívá dvojramennou kontaktní páku. Na kontaktním rameni každého pólu je osazen vlastní pohyblivý kontakt a přivařen splétaný měděný vodič, který je připojen k pevné proudovodné dráze. Hlavní osa rotace při provozním spínání je zajištěna pomocí společného hřídele. Přístroj je graficky znázorněn na následujícím obrázku, kde byl pro lepší názornost vynechán hlavní hřídel od spínacího systému.

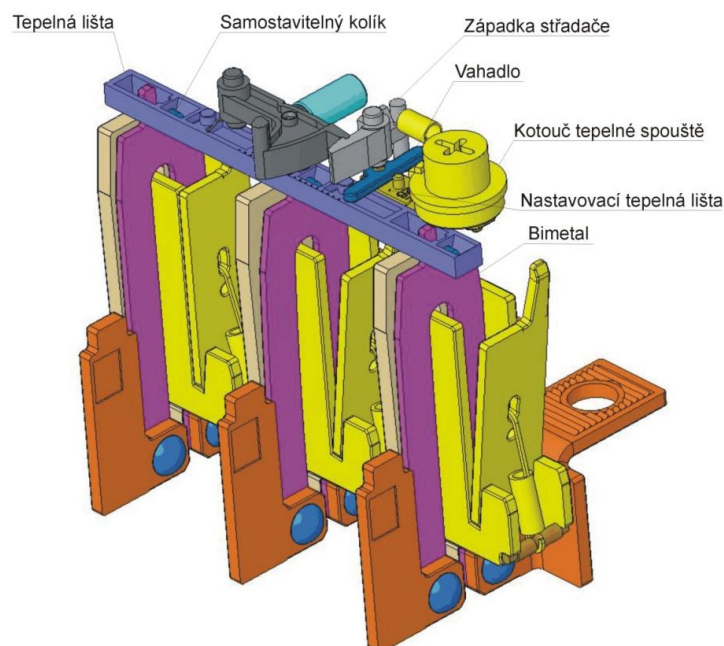


Obrázek 3: Jednokontaktní spínací systém výkonového jističe BC 160A [17].

Kde je popis jednotlivých částí následující:

1. přívodní svorka s nosičem pevného kontaktu,
2. pevný kontakt,
3. pohyblivý kontakt,
4. kontaktní páka (rameno),
5. splétaný měděný vodič,
6. základna splétaných měděných vodičů,
7. bimetalová spoušť s topítkem,
8. vývodní svorka.

Na dalším obrázku je podrobněji popsána funkce termomagnetické nadproudové spouště (TMTU) jističe.



Obrázek 4: Termomagnetická spoušť jističe BC 160A [17].

Protékající elektrický proud zahřívá proudovou cestu jističe pod bimetalem. Při přetížení dojde ke zvětšení jeho průhybu a svým horním koncem zatlačí do kolíku zatmeleného v tepelné liště. Tato lišta prostřednictvím vahadla převede svůj posuv na západku střadače, která po dostatečném otočení uvolní páku střadače. Páka střadače následně uvolní zámek volnoběžky a dojde k samočinnému vypnutí jističe.

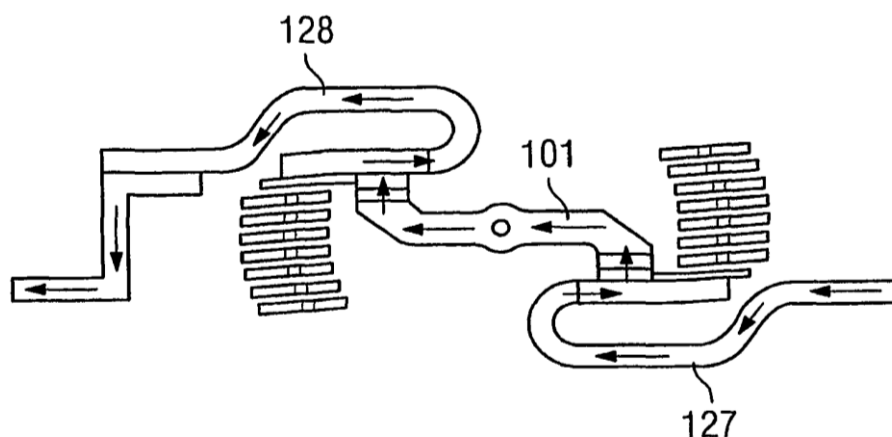
Na podobném principu pracuje i zkratová spoušť, realizována elektromagnetem s jedním závitem. Elektromagnetická síla vzniklá při průchodu nadproudu přitáhne kotvu zkratové spouště a vypínací mechanismus samočinně vypne jistič.

Pro správnou funkci jističe musí být v souladu činnost tepelné spouště s oteplením proudové dráhy.

3.2.2 Dvou- a vícekontaktní spínací systém s TMTU

Zásadní změnou v konstrukci kontaktního systému kompaktních jističů je vynález francouzských inženýrů společnosti Schneider Electric (i když základní princip byl znám dříve – např. v Rusku). Koncept rotačního systému, na Obrázku 5, se v podstatě stal učebnicí pro ostatní výrobce.

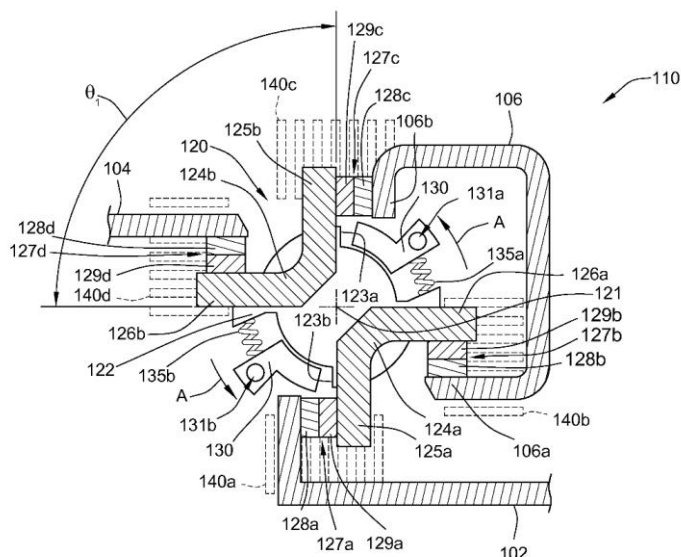
Rotační systém spínání je složen z pohyblivého rotačního kontaktu, který přeruší proudovou cestu ve dvou místech a silně omezuje zkraty s velmi vysokou zkratovou odolností. Tento systém může být dále doplněn tlakovým vypínacím systémem, který využívá energii elektrického oblouku, a zajistí tak extrémně rychlé vypnutí zkratu v řádu jednotek milisekund i při velkých zkratových proudech u předřazeného přístroje. Rotační kontakt při zkratu vlivem odpudivých elektrodynamických sil rychle reaguje na vzniklou situaci a eliminuje zkratový proud na mnohonásobně menší hodnotu. Tímto způsobem se zajistí velmi silné omezení proudu, podobně jako u pojistky.



Obrázek 5: Dvoukontaktní systém výkonového jističe (US Patent No. US8159319) [3].

Provozní výhodou rotačního systému oproti obvyklé konstrukci kompaktního jističe opatřeného pouze jednoduchým hlavním kontaktem je schopnost omezovat poruchové proudy mnohonásobně efektivněji. Tím se zaručí mnohem menší opotřebení kontaktů při zkratu a lepší poměr mezní a provozní vypínací schopnosti. Selektivní působení mezi kompaktními jističi je zajištěno až do 150 kA, mezi kompaktním a modulárním jističem až do 40 kA. Selektivita představuje vypnutí elektrické poruchy pouze jističem bezprostředně před místem poruchy, to je důležité z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti provozu.

Výrobce Schneider Electric se snaží neustále zlepšovat vypínací schopnosti výkonových jističů, a proto si v roce 2010 nechal patentovat čtyřkontaktní spínací systém:



Obrázek 6: Čtyřkontaktní spínací systém výkonového jističe (US Patent No. US8350168) [4].

Na pozici 102 a 104 jsou připojovací svorky, dále z nákresu patentu vyplývá, že vypínací proces přístroje je založen na dvojramenném mechanismu (pozice 124). Tyto prvky při elektrickém zkratu vlivem odpuzivých elektrodynamických sil rychle reagují na vzniklou situaci a eliminují zkratový proud až na čtyřech místech najednou. Problémy, které se zde pravděpodobně vyskytují, jsou

oteplení rotačních částí a samotná velikost přístroje. Výrobce od roku 2013 na tento projekt čerpá US grant, ale do dnešní doby tento přístroj není uveden na trh.

Při průzkumu trhu je možné nalézt i patenty na mnohem vyšší počet spínacích svazků, ale komplikovanost konstrukce je již natolik náročná, že jsou tyto patenty bez povšimnutí opomíjeny.

3.2.3 Polovodičový jistič

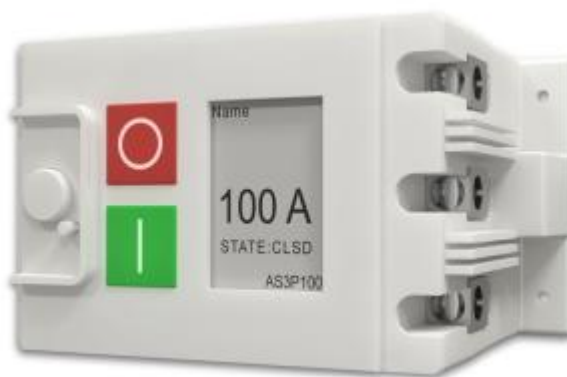
Moderní doba se neustále vyvíjí a polovodičové součástky se vyskytují v mnoha zařízeních, včetně spínacích přístrojů. V roce 2015 si nechal R. Kennedy ze společnosti ATOM POWER, která sídlí v Severní Karolíně, patentovat 1. výkonový jistič využívající polovodičové součástky, namísto osvědčených silových kontaktů.

Přístroj lze podle informací výrobce velice rychle překalibrovat na jakoukoliv hodnotu jmenovitého proudu v dané velikostní třídě. Je možné ho využít namísto soft-startu pro asynchronní motory. Nastavení libovolně komplikované vypínací křivky, pomocí tabletu, je pouze otázkou pár sekund. Největší výhodou, která ve všech případech předbíhá ostatní přístroje, je vypínací čas.

Nejkratší reakční doba přístroje je totiž pouhé 3 μ s. Jediný způsob, jak takto rychle reagovat na zkratové proudy, je využití vysoké vzorkovací frekvence a analýza vstupních dat pomocí di/dt . Tímto způsobem je možné velice rychle reagovat a okamžitě začít uzavírat implementovaný polovodič a zkratový proud nenechat projevit. Jelikož se jedná o vypínání zkratového proudu bez akustických doprovodů a světelných záblesků, jeví se tento jistič jako velice přátelský k obsluze a přírodě.

Polovodičový jisticí přístroj má i několik nevýhod. Jako ta nejdůležitější je zde vlastní ztráta přístroje a tedy nutnost aktivního chlazení. Výrobce udává účinnost 99,92 % při 15 % zatížení a 99,7 % při 100 % zatížení. Tyto hodnoty jsou na první pohled zajímavé, do té doby, než se přepočítají na absolutní ztráty. Rozvodná síť USA pracuje na napěťové hladině 480 VAC a tak jsou ztráty 38 W a 144 W. Tyto ztráty jsou na tomto přístroji 24 hod/den, a to již není zanedbatelná hodnota. Ztráty u osvědčených výkonových přístrojů se totiž pohybují okolo 10 W na pól (BC100A).

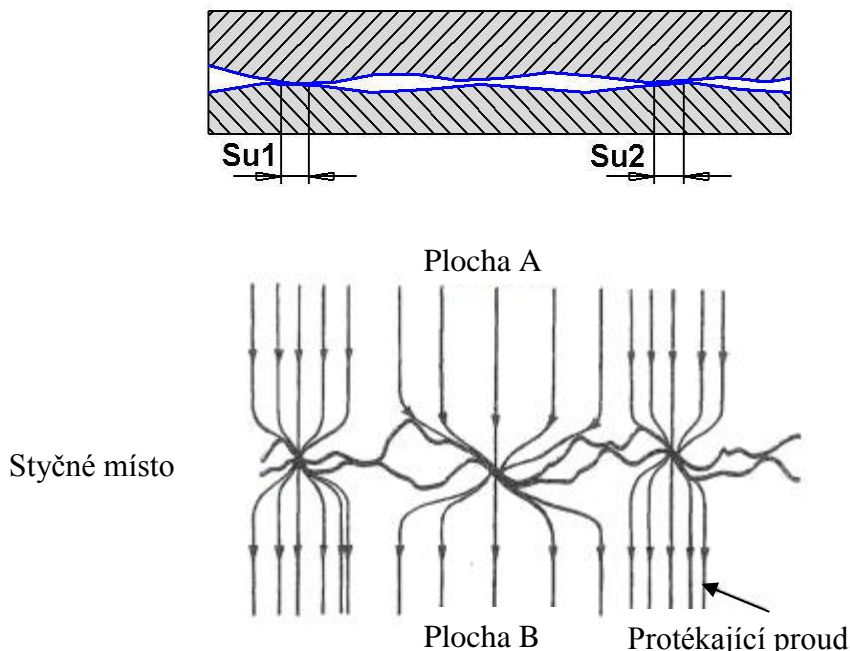
I když výrobce oznámil, že aktivně (červen 2018) probíhá certifikace těchto přístrojů (na normách UL489, UL991 a UL1557), vznikly zde pravděpodobně neočekávané problémy a stále si tyto přístroje nelze objednat.



Obrázek 7: Polovodičový výkonový jistič se jmenovitou hodnotou 100 A [25].

3.3 Odpor kontaktů

Dva vodiče elektrického proudu, které se vzájemně dotýkají a prochází jimi proud z jednoho místa do druhého, nazýváme kontaktem. Plocha žáného kontaktu není absolutně hladká, proto protéká proud z jednoho vodiče do druhého pouze v určitých místech viz Obrázek 8. Tento jev je jednou z hlavních příčin přechodového odporu kontaktů a je nazýván jevem úžinovým.



Obrázek 8: Styčné plochy kontaktů [20].

Pouze malá část kontaktu S_U představuje vlastní styčné místo celkové kontaktní plochy (S_Z) plošného kontaktu. Proudové čáry se do tohoto úžinového místa zužují a proud protéká pouze přes malou styčnou plochu S_U . Přítlačná plocha S_P je plocha, na kterou se těleso kontaktu deformuje působením přítlačné síly F . Tato plocha může být pokryta nevodivým povlakem, proto S_P bývá větší než plocha S_U , přes kterou elektrický proud skutečně protéká.

Úžina má určitý činný odpor, jehož velikost je stanovena pro čisté kovy ve vakuu. Prochází-li přes vodivou úžinu S_U elektrický proud, vznikne na úžinovém odporu R_U napětí:

$$\Delta U = R_U \cdot I \quad (1)$$

Ve skutečnosti je i tento povrch úžiny S_U pokryt (kromě zlata) vrstvami, které mají výrazně odlišné vlastnosti, než jaký má čistý kov. Má-li tato vrstva malou tloušťku (jedna molekulární vrstva oxidů) elektrony proniknou tunelovým jevem a chování této vrstvy bude velmi podobné čistému kovu. Ve skutečnosti je tato vrstva oxidů či nečistot větší, a proto bude přechodový odpor větší, než jaký by odpovídal odporu úžinovému.

Elektrický proud protéká přes přechodový odpor kontaktů. Zde dochází ke vzniku tepelných ztrát a následně k oteplení kontaktů. Už i malé oteplení přispívá k oxidaci styčných ploch a vyšší oteplení může vést ke změknutí kontaktů.

Oteplení stykového bodu je úměrné druhé mocnině úbytku napětí, vznikající na stykovém místě:

$$\Delta \vartheta_S = \vartheta_S - \vartheta_0 = \frac{\Delta U_S^2}{8\lambda\rho}, \quad (2)$$

kde ϑ_s je teplota stykového bodu [$^{\circ}\text{C}$]; ϑ_0 je teplota kontaktu v těsné blízkosti styku [$^{\circ}\text{C}$]; ΔU_s^2 je úbytek napětí v místě styku; ρ je rezistivita kontaktu [Ωm]; λ je koeficient teplotní vodivosti kontaktu [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Při určení ϑ_s je třeba zohlednit teplotní závislost kontaktního odporu a je zapotřebí znát teplotu vodiče ϑ_0 v blízkosti styku, neboli vliv procházejícího elektrického proudu.

Tento vliv záleží na dvou složkách. První složkou je ustálené oteplení proudové cesty s konstantním průřezem:

$$\Delta\vartheta_i = \frac{I_Z^2 R_V}{\alpha S_{chl}}, \quad (3)$$

kde α je koeficient přestupu tepla [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]; S_{chl} je plocha chladicího povrchu.

Druhou složkou je oteplení kontaktu:

$$\Delta\vartheta_U = \frac{U_s \sqrt{\Delta\vartheta_i}}{2\sqrt{\lambda\rho}} \quad (4)$$

Při objasnění jednotlivých složek je možné teplotu stykového bodu vyjádřit:

$$\vartheta_s = \Delta\vartheta_i + \Delta\vartheta_U + \Delta\vartheta_s + \vartheta_{teplota\ okolí} \quad (5)$$

Teplota stykového bodu kontaktů je dána součtem ustáleného oteplení proudové cesty s konstantním průřezem, oteplením kontaktu, oteplením stykového bodu a teplotě okolí.

3.4 Přenos tepla

Přenosem tepla se rozumí přenos tepelné energie v tělesech a tekutinách (kapalinách a plynech) vyvolaném rozdílem teplot. Rozeznáváme tři způsoby přenosu tepla:

- kondukce (vedení),
- konvekce (proudění),
- radiace (sálání).

Tepelná energie určitého množství látky reprezentuje sumu průměrné kinetické energie jejich částic (molekul a atomů). Při přenosu tepla vedením se uskutečňuje výměna energie při srážkách částic s rozdílnými teplotami. Kondukce silně závisí na vlastnostech média a vyskytuje se nejen v tuhých tělesech, ale i v kapalinách a plynech.

Molekuly kapalin a plynů se mohou volně pohybovat a při tomto pohybu přenášet energii z chladnější oblasti do teplejší. Tento přenos tepla doplněný o mezimolekulové tření se nazývá přenos tepla prouděním (konvekce). Pokud pohyb tekutin vyvolá pouze rozdíly její hustoty způsobené rozdílnou teplotou, hovoříme o volné (přirozené) konvekci. Pokud je proudění vyvolané vnější silou (pumpováním, foukáním) hovoříme o nucené konvekci.

Všechna tělesa s nenulovou absolutní teplotou vyzařují do okolí tepelnou energii. Tepelné záření je jediný způsob přenosu tepla, které nepotřebuje pro přenos energie cizí médium. Tepelná energie se vyzařuje z povrchu objektu prostřednictvím elektromagnetických vln. V případě, že elektromagnetické vlny zasáhnou povrch cizího tělesa, část energie se odrazí a část se pohltí.

V technické praxi, se setkáme se všemi třemi způsoby přenosu tepla. Často je však podíl způsobu přenosu tepla výrazně rozdílný a úlohu lze redukovat pouze na dva či pouze jeden způsob přenosu.

Speciálním případem změny tepelné energie je fázový přechod (tuhnutí, tání; vypařování, kondenzace; sublimace, desublimace), kdy při konstantní teplotě látka spotřebovává teplo (při uvolňování mezimolekulových vazeb) anebo vydává teplo (při vytváření mezimolekulové vazby látky).

3.4.1 Základní vztahy

Pro analýzu přenosu tepla se využívají vztahy určující množství energie, která projde za jednotku času jednotkou plochy. Hnací silou rychlosti energetického toku je teplotní rozdíl (teplotní gradient). Pro přenos tepla vedením se tento vztah nazývá Fourierův zákon. Pro jednorozměrnou geometrii má vedení tepla tvar:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (6)$$

kde q [W/m²] je hustota tepelného toku ve směru x , λ [W/mK] je součinitel tepelné vodivosti látky, T [K] je teplota a dT/dx je teplotní gradient ve směru x . Teplo je vedené ve směru klesající teploty, a proto pro kladnou hustotu toku je teplotní gradient záporný.

Přenos tepla mezi proudící tekutinou s teplotou T_{tek} a stěnou tuhého tělesa s teplotou T popisuje Newtonův ochlazovací zákon:

$$g = h(T - T_{tek}), \quad (7)$$

kde h [W/(m²K)] je koeficient přestupu tepla konvekcí (koeficient prostupu vrstvy).

Množství tepla tělesem vyzářené z absolutně černé plochy S za jednotku času (tepelný tok) Q [W], s teplotou T charakterizuje Stefan-Boltzmannův zákon:

$$Q = \sigma T^4 S, \quad (8)$$

kde σ [W/m²K⁴] je Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴) a T je absolutní teplota plochy S . Teplo, které vyzařuje reálný povrch při této teplotě, je všeobecně menší, což se vyjadřuje bezrozměrným násobkem (emisivitou) $\varepsilon < 1$. Pokud horký objekt s plochou S_1 , emisivitou ε_1 a teplotou T_1 je celý obklopen mnohem větší plochou o teplotě T_2 , bude tepelný tok:

$$Q = qS_1 = \varepsilon_1 \sigma S_1 (T_1^4 - T_2^4). \quad (9)$$

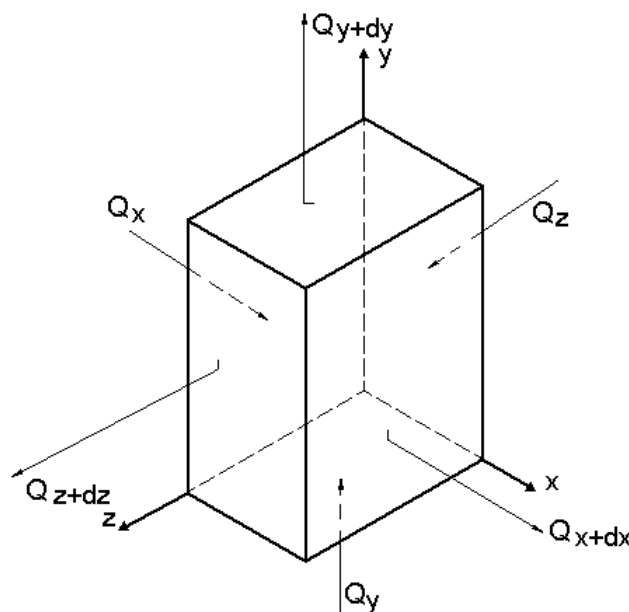
Analýzou množství vzájemně vyměněného vyzářeného tepla dvou těles s plochami S_1 a S_2 se rovnice (8) změní na:

$$Q = f_1 f_2 \varepsilon_1 \sigma S_1 (T_1^4 - T_2^4), \quad (10)$$

kde bezrozměrný součinitel f_1 vyjadřuje emisně-absorční vlastnosti obou ploch a f_2 vzdálenost a vzájemnou geometrickou orientaci obou vyzařujících ploch.

3.4.2 Rovnice vedení tepla

Základní proměnnou popisující vedení tepla v tuhém tělese je teplota jako funkce polohy v ustáleném čase $T \equiv T(x, y, z)$. Pro nestacionární vedení tepla je další proměnnou čas: $T \equiv T(x, y, z, t)$. Z této základní funkce jsou vyjádřeny ostatní proměnné: teplotní gradient z parciální derivace nebo tepelný tok z Fourierova zákona. Funkce $T \equiv T(x, y, z, t)$ je vyjádřena z diferenciální rovnice vedení tepla odvozené ze zákona zachování energie pro element na Obrázku 9.



Obrázek 9: Element pro analýzu vedení tepla v tělese.

Velikost vedeného tepla za jednotku času Q [W=J/s] ve směru souřadnicových os lze v jakémkoliv bodě tělesa (x, y, z) rozepsat do zkrácené Taylorovy řady:

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \\ Q_{y+dy} &= Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \\ Q_{z+dz} &= Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (11)$$

Obsahuje-li element vnitřní zdroj tepla:

$$Q_{gen} = \bar{Q} dx dy dz, \quad (12)$$

kde \bar{Q} [W/m³] je vydatnost tepelného zdroje.

Maximální velikost akumulovaného tepla v elementu (maximální množství tepla, které je schopen v sobě element uchovat) je závislá na specifické tepelné kapacitě materiálu c [J/(kgK)], hmotnosti (hustota ρ a objem) a rychlosti změny teploty:

$$Q_{akum} = c \rho dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (13)$$

Tepelnou bilanci elementu za jednotku času lze charakterizovat tak, že součet přivedeného tepla a generovaného tepla se musí rovnat součtu odvedeného tepla a akumulovaného tepla. Podle obrázku 9 bude tato rovnice vypadat následovně:

$$Q_x + Q_y + Q_z + \bar{Q} dx dy dz = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} + c \rho dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (14)$$

Do této rovnice je dosazena hodnota přivedeného tepla z rovnice (11) a uspořádány členy:

$$-\frac{\partial Q_x}{\partial x}dx - \frac{\partial Q_y}{\partial y}dy - \frac{\partial Q_z}{\partial z}dz + \bar{Q}dxdydz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}dxdydz. \quad (15)$$

Podle Fourierova zákona (rovnice 6) platí:

$$\begin{aligned} Q_x &= q_x dydz = -\lambda_x dydz \frac{\partial T}{\partial x} \\ Q_y &= q_y dxdz = -\lambda_y dxdz \frac{\partial T}{\partial y} \\ Q_z &= q_z dydx = -\lambda_z dydx \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (16)$$

Uvedené vztahy je třeba doplnit do rovnice (15) a vydělit objemem elementu $dxdydz$. Získaná diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \bar{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

Pokud se materiál z hlediska tepelné vodivosti chová izotropně ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$), rovnice se zjednoduší:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\bar{Q}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

kde $\alpha = \lambda / (\rho c)$ je součinitel tepelné vodivosti

Po provedení analýzy ustáleného vedení tepla, bez vnitřního zdroje lze rovnice vedení tepla vyjádřit:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (19)$$

3.4.3 Rovnice vedení a proudění tepla

Pokud se spolu s vedením uplatňuje i proudění tepla, je přenos tepla popsán následujícími základními diferenciálními rovnicemi, které vyjadřují zákony zachování určité veličiny.

Rovnice kontinuity (zákon zachování hmotnosti):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (20)$$

kde ρ je hustota vzduchu a \vec{v} je vektor rychlosti proudění.

Zákon zachování hybnosti (aplikace druhého NPZ):

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} \vec{v}) = \text{grad } p + \text{div } \vec{\tau} \quad (21)$$

kde p je tlak a $\vec{\tau}$ je tenzor vnitřního tření.

Zákon zachování energie (rozšířený I. zákon termodynamiky):

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho H \vec{v}) = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + q_H + \operatorname{div}(\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (22)$$

kde H je entalpie, k je tepelná vodivost, T je teplota a q_H je hustota generovaného tepelného výkonu.

3.5 Počítačová dynamika tekutin

Tento vědní obor je spíše známý pod anglickým názvem Computational Fluid Dynamics (CFD). Tato moderní metoda využívá výpočetní techniku pro řešení výše uvedených rovnic. Pro použití metodiky CFD je zapotřebí vytvoření geometrického modelu. Na tento model jsou následně aplikovány matematické postupy tak, aby ze zadaných okrajových a počátečních podmínek poskytl počítač validní numerický popis probíhajícího děje při respektování fyzikálních zákonů.

Obrovskou výhodou CFD je vynechání přípravy mnoha funkčních vzorků a postupného testování. Tyto kroky se doporučují provést až na finálním návrhu, a tím dojde k obrovské úspoře času i financí. Avšak mělo by být pravidlem, že pokud je to možné, ověření výsledků by mělo proběhnout vždy. Mohlo by se totiž stát, že při špatně zadaných okrajových podmínkách bude výpočetní program pracovat s neakceptovatelnou chybou.

Výpočet může vyžadovat velký počet iterací, než je docílen stav konvergence, avšak řešení je vyhodnoceno jako zkonvergované, pokud jsou změny klíčových hodnot malé.

Sledování konvergence obsahuje:

- residua,
- bodové hodnoty,
- integrální bilance toků,
- integrální síly.

Jak již bylo popsáno výše, při výpočtu může docházet k nechtěným chybám. To záleží převážně na programátorovi a jeho metodických krocích. Níže jsou vypsány faktory, které se nejvíce podílí na výskytu výpočetních chyb při použití CFD:

- hustota sítě,
- diskretizační chyba (přesnost numerického postupu),
- přesnost modelu.

3.6 Solidworks Flow simulation

Hlavní prostředí numerického programu je CAD systém SolidWorks od společnosti Dassault Systemes. Výrobce tohoto strojírenského 3D programu umožňuje snadnou integraci modulů třetích stran, a proto je možné tento systém jednoduše využívat pro potřeby CAE. Pro komplexní simulaci dynamiky tekutin a sdílení tepla je zapotřebí využít integrovaný nástroj SolidWorks Flow Simulation a jeho základní verzi rozšířit o tepelné analýzy elektrických zařízení. Nespornou výhodou této implementace je rychlá úprava modelu ve stejném prostředí a díky tomu následně nevznikají komplikace s importováním geometrie do numerického programu.

Samotný numerický výpočet pomocí tohoto programu je založen na Navier Stokesových rovnicích v integrálním tvaru. Tyto rovnice však musí být rozšířeny o další, např. materiálové rovnice, či stavovou rovnici v určitém tvaru podle povahy kapaliny. Tyto rovnice jsou následně řešeny pomocí

diskretizace za využití metody konečných objemů, která je nejpoužívanější diskretizační metodou v oblasti proudění tekutin. Numerický výpočet pomocí diskretizace parciálních diferenciálních rovnic, či odpovídajících integrálních rovnic ve 3D je nutností, neboť přesné analytické řešení není vzhledem ke složitosti možné nalézt.

Autorem doplňku Flow Simulation je společnost Mentor Graphics, která dodává tento modul i do ostatních CAD programů jako je: Creo, CATIA V5, Solid Edge, SolidWorks a Siemens NX. Posledním jmenovaným je konstrukční program společnosti Siemens a dle posledních informací Mentor Graphics prošel v říjnu tohoto roku akvizicí a nyní vystupuje jako dceřiná společnost této značky. Budoucnost tohoto doplňku pro ostatní CAD systémy je tedy nejistá.

3.7 Vstupní data pro numerický výpočet

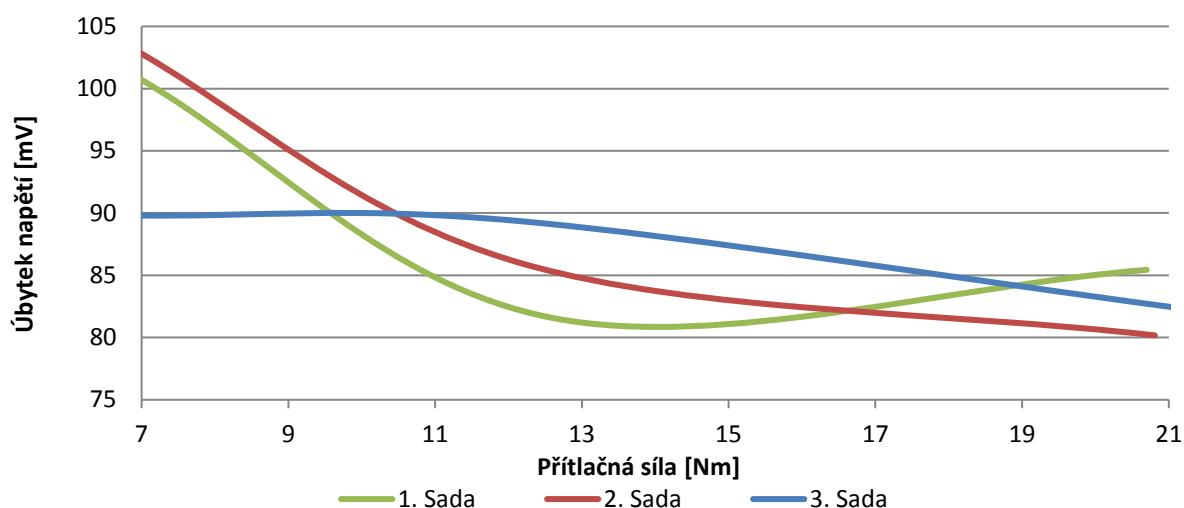
Výpočetní program potřebuje pro vypracování korektního výstupu řadu vstupních parametrů. Běžně požadované hodnoty materiálů jsou:

- hustota materiálu,
- specifické (měrné) teplo,
- tepelná vodivost,
- elektrická vodivost,
- viskozita,
- emisivita.

Tyto hodnoty jsou v databázích většinou uvedeny jako teplotně nezávislé. Pro korektní výstup numerického modelu je zapotřebí tyto hodnoty přepočítat na teplotně závislé. K tomuto úkonu lze využít dostupné materiálové databáze (např. MatWeb, MatDat a engineering.com). Jediná hodnota, kterou není možné dohledat, je přechodový odpor kontaktního styku. Technologie, která se používá při výrobě těchto komponentů (prášková metalurgie), je náročná a pro velký počet možných kombinací se tato hodnota nikde neuvádí. Nejjednodušší způsob pro získání těchto hodnot je provedení laboratorního měření na dodaných vzorcích.

3.7.1 Přechodový odpor kontaktního styku

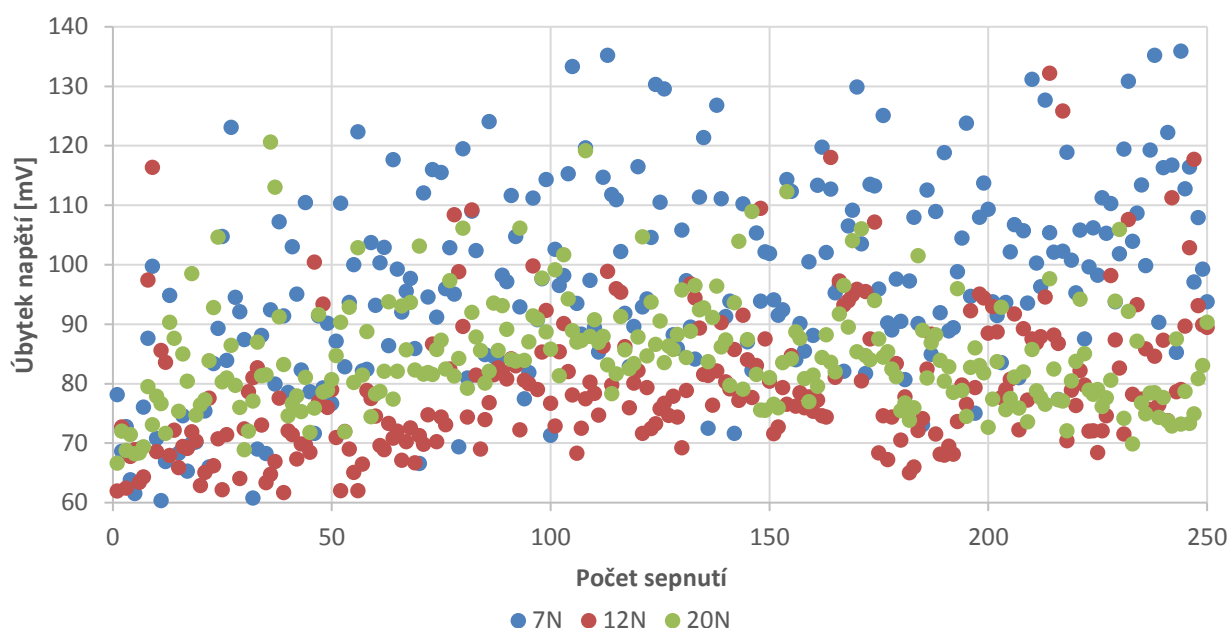
Jak již je popsáno v kapitole 3.3 *Přechodový odpor*, správné interpretování přechodových vrstev, které vznikají na kontaktním styku, je nejnáročnější bod tepelné simulace elektrických přístrojů. Vrstvy, které zde vznikají, mají nejenom elektrický odpor, ale i odpor tepelný a pro velký výběr z dodávaných kombinací je zapotřebí provést laboratorní měření na vybraných kontaktních sadách. Dle předchozích zkušeností s kontaktními materiály (stykový odpor, svařitelnost, míra eroze) byly vybrány 3 sady pro porovnání. Výsledkem tohoto měření je graf se závislostí úbytku napětí (a po přepočtu i elektrického odporu) na přitlačné síle kontaktního styku.



Obrázek 10: Vliv přítlačné síly na kontaktní styk, 3 různé sady kontaktů.

Díky přechodové charakteristice chování kontaktního styku je nyní jednoduché tuto hodnotu zadat do numerického modelu a aplikovat ji na styčnou plochu kontaktů.

Na požadavek konstrukční kanceláře je test rozšířen o ověření stálosti přechodového odporu při mechanické životnosti s elektrickým proudem o 250ti operacích.



Obrázek 11: Ověření stálosti kontaktního styku pro různé přítlačné síly, 1. sada, 250 operací

Pomocí speciálního laboratorního měření lze potvrdit, že po 250ti operacích jsou vybrané kontaktní sady pouze mírně opotřebované a po ustálení si drží svojí hodnotu přechodového odporu.

Model spínacího přístroje má vysokou hodnotu mezní vypínací schopnosti. Z tohoto důvodu jsou na kontaktním ramínku umístěny dva páry kontaktů. Rozpojení proudové dráhy dojde na dvou místech zároveň, a tím dojde k rychlejšímu a efektivnějšímu způsobu vypnutí. Bohužel kontaktní

páka je z tohoto konstrukčního hlediska nejkritičtější částí přístroje, a to jak při ustálené hodnotě, tak mnohem hůře při přetížení.

Existuje mnoho návrhů [22, 23] navržených k vyjádření elektrického odporu mezi kontakty, avšak jeden z nejčastěji používaných popisuje, že elektrický odpor závisí na materiálech kontaktů a výsledné kontaktní síle:

$$R_s = k \cdot F_c^{-n}, \quad (23)$$

kde R_s je přechodový odpor; k je materiálová konstanta a F_c je kontaktní síla, kde exponent n popisuje tvar kontaktů. Například pro plochý kontakt a válec bude n dosahovat hodnot v rozmezí 0,5 – 0,7.

Kontaktní síla může být standardně konstantní, ale pouze při podmínkách ustáleného stavu (zvýšení teploty při jmenovitém proudu). Kontaktní odpor zůstává pro simulaci ustáleného stavu konstantní.

Situace při simulaci oteplení při přetížení je však odlišná. Jelikož dochází k působení Holmových elektrodynamických sil při průtoku proudu přes spínací systém, dochází zde i k působení zvýšené koncentrace proudu, viz Obrázek 8.

Hodnota této síly může být popsána následující rovnicí:

$$F_u = I^2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7}, \quad (24)$$

kde D je průměr kontaktů (pro pravoúhlý tvar $a \times b$ lze vyjádřit jako: $D = \sqrt{a \cdot b}$) a d je průměr kontaktní plošky.

Tato síla je zanedbatelná při porovnání s předchozí, ale významně stoupá při vyšších proudech, což znamená, že celková přitlačná síla dosahuje nulové hodnoty při nadskoku kontaktu. Z omezujícího hlediska je vhodné mít co nejmenší nadskokovou hodnotu kontaktního systému, ale z hlediska eroze kontaktů a možnosti nechtěného svaření kontaktů je nutné tuto hodnotu nastavit na určitou mez. Tato mez musí být určitě nad maximální hodnotou možnosti nastavení zkratové spouště. Pokud by tato hodnota byla níž, docházelo by k prohořívání mezi kontaktním stykem a při dlouhodobém čekání na vybavení nadproudu od tepelné spouště by docházelo k enormní erozi kontaktů nebo přímo ke svaření.

Požadavky, které jsou kladeny na kontaktní materiál, jsou vysoké. Vlastní výroba je velice komplikovaná, neboť materiály těchto částí jsou založeny na práškové metalurgii. Tyto materiály jsou reprezentovány jako velice odolné proti účinkům elektrického oblouku (eroze materiálů). Na druhou stranu ale musí mít dostatečně malý elektrický odpor. Tyto požadavky si bohužel trochu rozporují, a proto je vždy nutné najít kompromis.

Všechny tyto podmínky musí být vzaty v úvahu při přípravě numerického modelu, neboť bez těchto hodnot by výsledky byly velice hrubé a nereprezentovaly by skutečné procesy, které se při těchto procesech dějí.

4 ZJEDNODUŠENÝ JEDNOPÓLOVÝ MODEL

Při zhodnocení všech kritérií, které jsou na moderní spínací přístroje kladeny, je na prvním místě chování přístroje při vypínacím procesu, kdy za všech okolností musí dojít k bezpečnému odpojení vadného místa od zdroje. Nejsložitější děj obvykle představuje vypínání poruch vzniklých v důsledku zkratů, což musí být ověřeno v rámci zkušebních sledů ověřujících zkratovou vypínací schopnost. Zkratová zkouška je opravdu náročná (přístroj vypíná i více než 150 kA předpokládaného zkratového proudu) a je zapotřebí vybrat nejvhodnější konstrukci.

Druhou nejdůležitější zkouškou je zkouška oteplení jednotlivých částí přístroje při jmenovitém provozu, aby nedošlo k poškození izolace vodičů, popálení obsluhy atd. Tyto přístroje se provozují na volném vzduchu a částečná tepelná ztráta je zde požadována. Vybraný spínací přístroj totiž obsahuje tepelnou spoušť – bimetal.

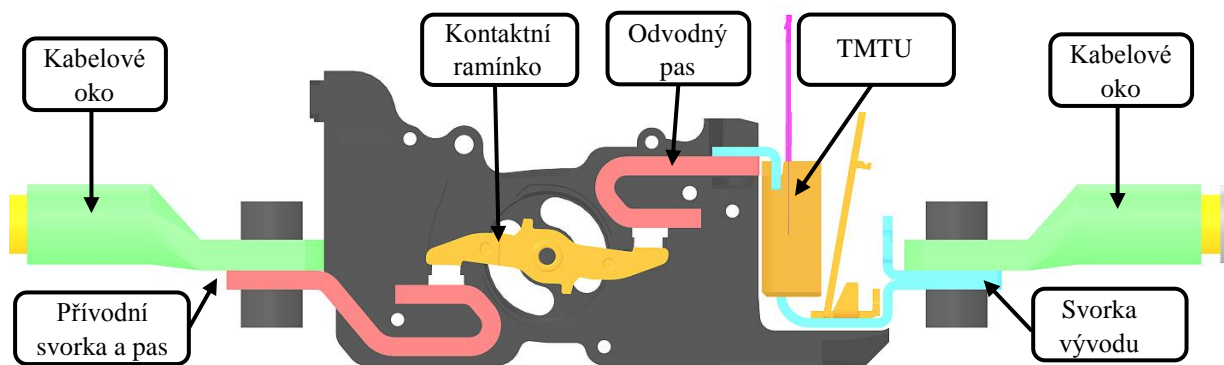
Konstrukce a seřízení tohoto typu jističe je velice komplikované. Prvky, které by byly vhodné pro spolehlivé chování jističe během zkratových zkoušek, zcela nevyhovují chování jističe při jmenovitém zatížení či přetížení. Při konstrukci těchto přístrojů proto musí obstát kompromis a model vytvořený v rámci této dizertační práce by měl napomoci popsat jednotlivé jmenovité režimy přístroje, včetně přetížení, a to z pohledu oteplení.

Požadavek na první numerické modely je porovnat:

1. různé modely kontaktního ramínka,
2. různé modely přívodních pasů a
3. doporučit sadu kontaktů pro rotační spínací systém.

Pokud je zapotřebí porovnat pouze jednotlivé modely a vybrat, který z nich bude dosahovat výhodnějších výsledků, postačí pouze jednofázové výpočty. Tímto zjednodušením dojde k nezanedbatelnému urychlení výpočtu, a aby byl výpočet ještě rychlejší, lze odstranit i následující prvky, jako je ovládací mechanismus, šroubové spoje kazety, různá ložiska, táhla, pružiny atd.

Zjednodušený model vypadá následovně:

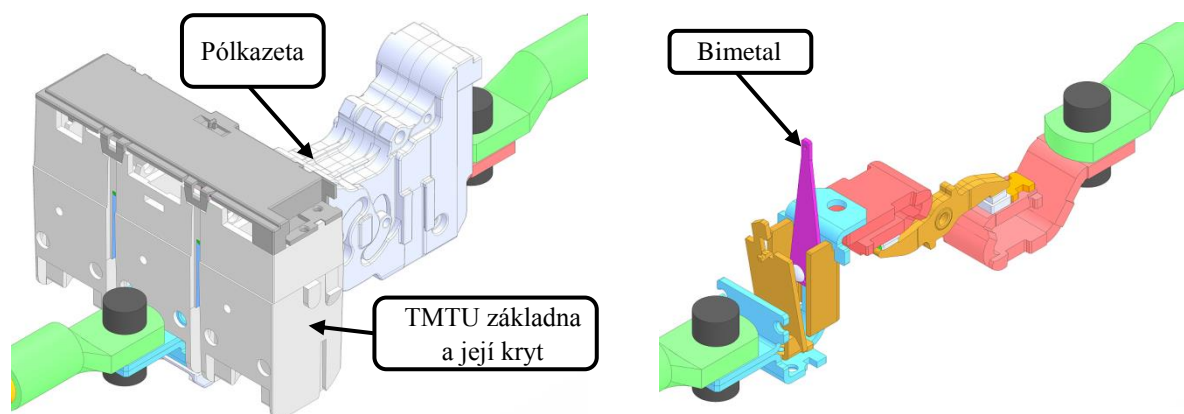


Obrázek 12: Jednopólový model spínacího přístroje uložený v pólkazetě.

4.1 Tvorba modelu a simulace ustáleného stavu

Skutečný výkonový jistič v kompaktním provedení je obvykle složen z více jak 300 součástí. Pro jednoduchý model spínacího přístroje postačí pouze originální proudová dráha, včetně tepelné a magnetické spouště doplněné o kazetu spínacího systému. Tento zjednodušený model je pro

numerický výpočet, který bude pouze porovnávat zvolené varianty a hledat nejvhodnější verzi pro finální konstrukci přístroje, dostačující. Rozdíl oteplení přístroje u takto zjednodušeného modelu vůči reálnému modelu je procentuálně stejný, jako kdybychom fyzický vzorek zatížili pouze $0,8 \times I_n$.



Obrázek 13: Zjednodušený jednofázový (1f) model jističe.

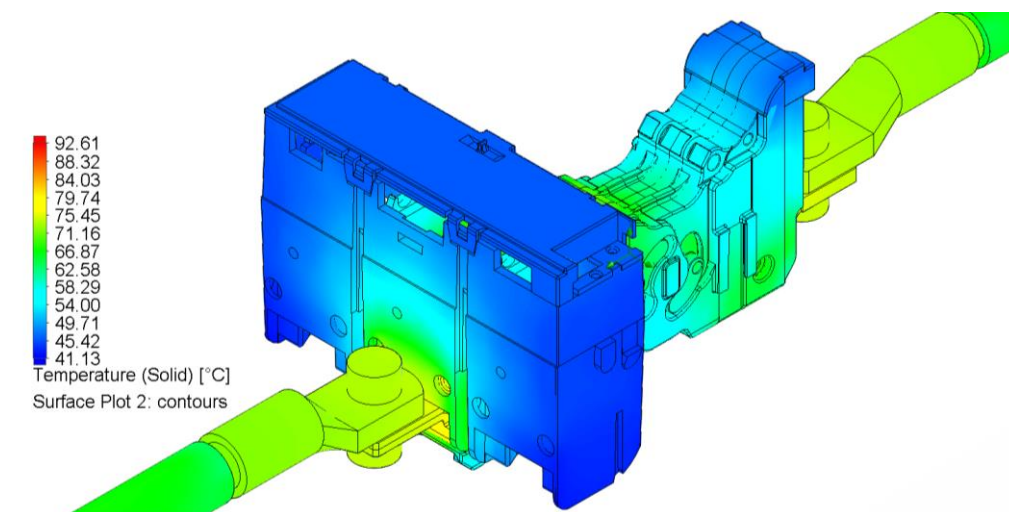
Drobná modifikace proudové dráhy byla nutností, neboť problematika tolerancí, která u konstruktérů převládá, by nedovolila tvorbu výpočetní sítě z důvodů kolize těles. Po úpravě geometrie bylo zapotřebí aplikovat okrajové podmínky včetně přechodových odporů na silové kontakty proudové dráhy. Postup v programu SolidWorks byl následující:

- Definovat oblast výpočtu
- Zvolit použité materiály a nastavit následující parametry:
 - Hustota
 - Specifické teplo
 - Tepelná vodivost
 - Elektrická vodivost / odpor
 - Bod tání
 - Drsnost povrchu
 - Emisivita
- Aplikovat přechodový odpor:
 - Tepelný
 - Elektrický
- Nastavit tok elektrického proudu
- Vybrat měřící body
- Nastavit meteorologické podmínky:
 - Teplota prostředí
 - Teplota prvků
 - Tlak
 - Vlhkost, atd.

Po zadání veškerých těchto podmínek je možné vytvořit výpočetní síť. Celkový počet buněk vždy odpovídá náročnosti modelu. Zvýšené podmínky na kvalitu a jemnost výpočetní sítě jsou

aplikovány pouze v oblasti silových kontaktů, kontaktního ramínka a topítka tepelné spouště. Ostatní prvky jsou nastaveny na základní rozdělení.

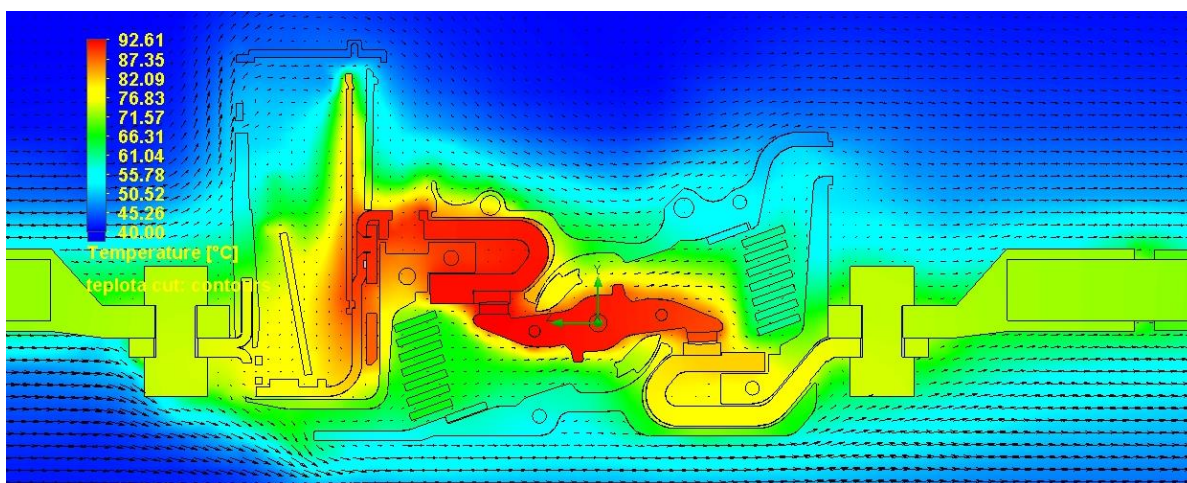
Model je počítán pouze 1f se zatížením 250 A a při teplotě okolí 40 °C. Nejdůležitějším výstupem numerického modelu, je rozložení teplotního pole, viz následující obrázek.



Obrázek 14: Rozložení teplotního pole modelu V0.1, 250 A.

Výstup numerického modelu při jednopólovém zapojení se jeví věrohodně (rozložení teplotního pole je souvislé). Teplota jednotlivých částí přístroje vykazuje snížené hodnoty oteplení. To je způsobeno tím, že ve skutečnosti je polkazeta i při jednopólovém zatížení obklopena dalšími dvěma póly a tyto jsou uzavřeny do vnějšího krytu celého přístroje.

Na dalším obrázku je rozložení teplotního pole modelu V0.1 vyobrazeno v řezu, včetně okolního vzduchu a proudnic neboli proudových čar pomocí vektorů. Tato trajektorie popisuje pohyb jednotlivých částic kapalin při proudění. Dle předpokladu je pohyb teplého vzduchu proti směru gravitace, neboť teplý vzduch, který se v okolí přístroje vyskytuje, je lehčí a stoupá vzhůru (vztlak). Toto přirozené proudění je převážně laminárního původu a v okolí přístroje převažuje. Uvnitř přístroje, či v těsné blízkosti, jsou tyto proudnice různoběžné a různě stočené, a proto se jedná o proudění turbulentní.



Obrázek 15: Rozložení teploty na zjednodušeném modelu V0.1 včetně proudnic, 250 A – řez.

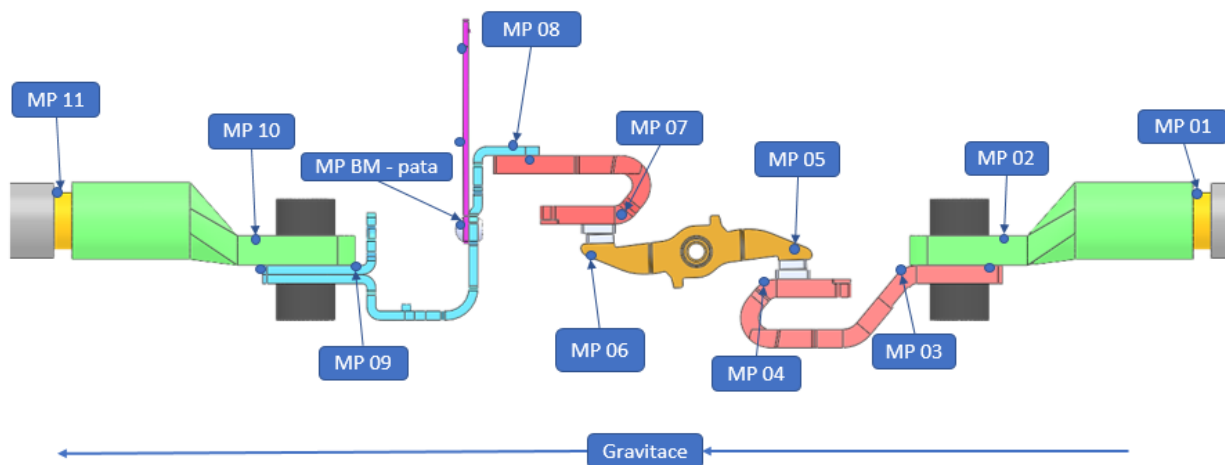
Výsledky vybraného modelu V0.1 jsou korektní, a proto je možné vypočítat i ostatní varianty proudových drah a následně je porovnat.

4.2 Porovnání různých sad silových kontaktů v ustáleném stavu

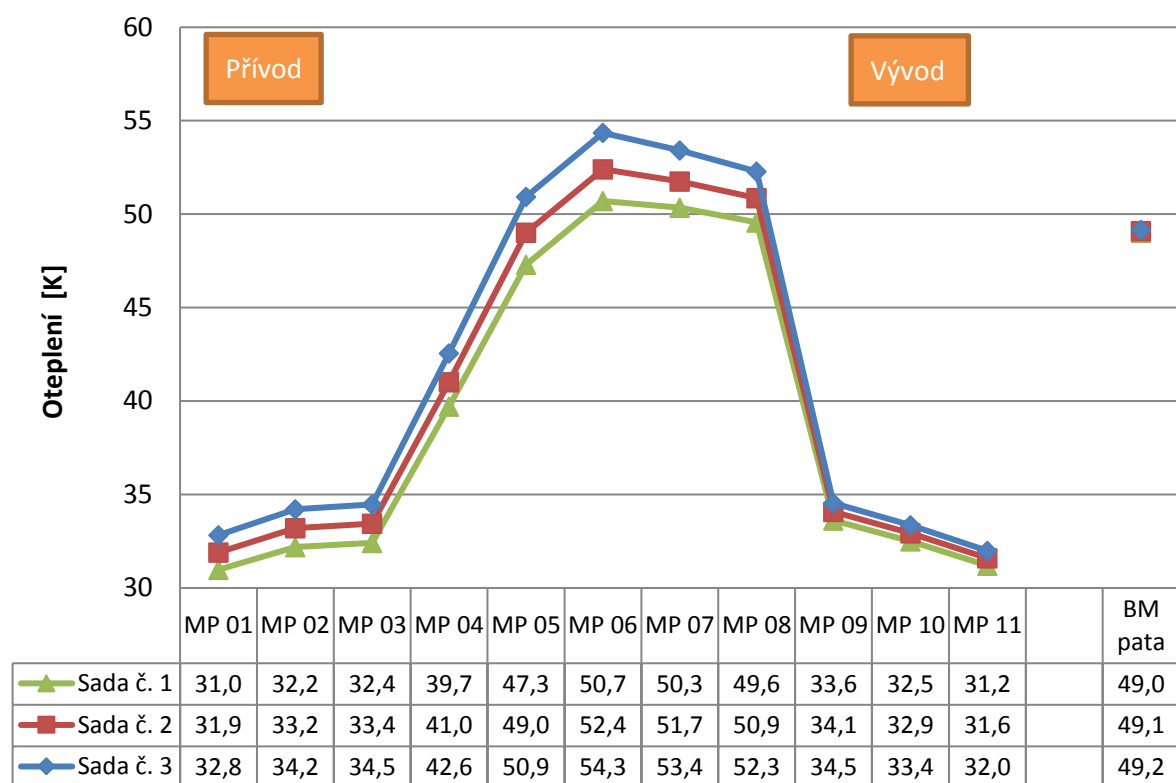
V kapitole: 3.7.1 *Přechodový odpor kontaktů* je laboratorním měřením analyzováno chování tří různých sad kontaktů. Tyto kontakty jsou vyráběny moderním technologickým postupem, a to spékáním. Hlavní přísadou těchto kontaktů je stříbro, které tvoří více jak polovinu všech materiálů. Ostatní materiály jsou voleny dle potřeb a nároků uživatele. Jednotlivé hodnoty materiálů kontaktů různých sad jsou aplikovány na model V0.1 a vypočteny. Numerický výpočet je proveden pro jmenovité zatížení přístroje 250 A, při teplotě okolí 40 °C.

Pro jednodušší porovnání vypočítaných hodnot jsou na model implementovány měřicí body.

Chyby, které mohou vznikat při vytváření výpočetních sítí těchto modelů, jsou eliminovány tak, že model pracuje při všech výpočtech se stejnou sítí.



Obrázek 16: Poloha měřicích bodů MP na proudové dráze přístroje.



Obrázek 17: Porovnání numerického modelu pro různé varianty silových kontaktů – ustálený stav.

Obrázek 17 ukazuje oteplení přístroje získaného z numerického modelu pro tři různé hodnoty elektrického odporu (a tedy zadaných ztrát), který byl změřen experimentálně. Výsledky vykazují dobrou shodu. Kontaktní sada č. 1 má nejmenší přechodový odpor, a proto nejnížší hodnoty oteplení, oproti kontaktní sadě č. 3. Tento rozdíl zapříčiní to, že teplota na patě bimetalu stoupne o pouhých 0,2 K.

Doporučení pro výběr silových kontaktů numerický model neumožňuje, neboť rozdíl mezi kontaktními sadami je při oteplení minimální. Velký vliv na oteplení přístroje má v tomto případě vlastní chování (eroze) kontaktů při výkonových zkouškách a mechanické životnosti s elektrickým proudem. Vezme-li se v úvahu určitá nestabilita ovládacího mechanismu a únava použitého materiálu, vychází jako nejlepší zkušební sada č. 2. Přechodový odpor totiž od určité přitlačné síly v podstatě mírně lineárně klesá. Z tohoto důvodu je pro nadcházející numerické výpočty použita sada kontaktů č. 2. Obrázky z rozložení teploty pro různé sady silových kontaktů jsou v příloze na str. 80.

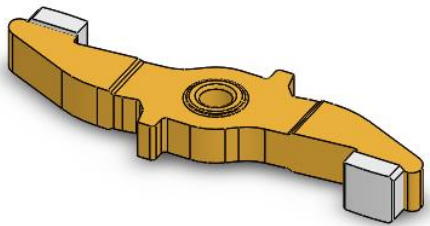
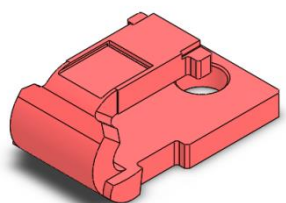
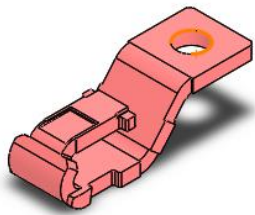
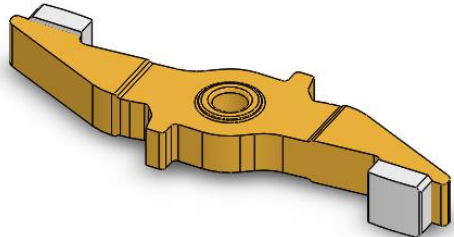
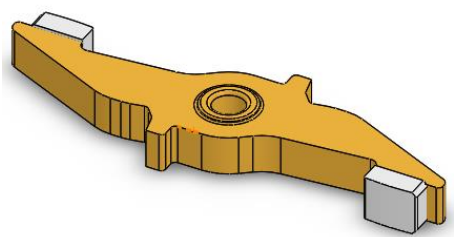
4.3 Porovnání navržených komponentů v ustáleném stavu

Pro numerické výpočty byl do této doby vždy použit základní model - verze V0.1, na kterém se provedl první výpočet a porovnal se vliv silových kontaktů na vlastní oteplení přístroje, viz předchozí kapitola.

U další sady modelů je zapotřebí porovnat, jaká geometrie je nejvhodnější pro kontaktní ramínko. Jsou navrženy celkem 3 modely. Pro zjednodušení jsou v následující tabulce graficky vyobrazeny

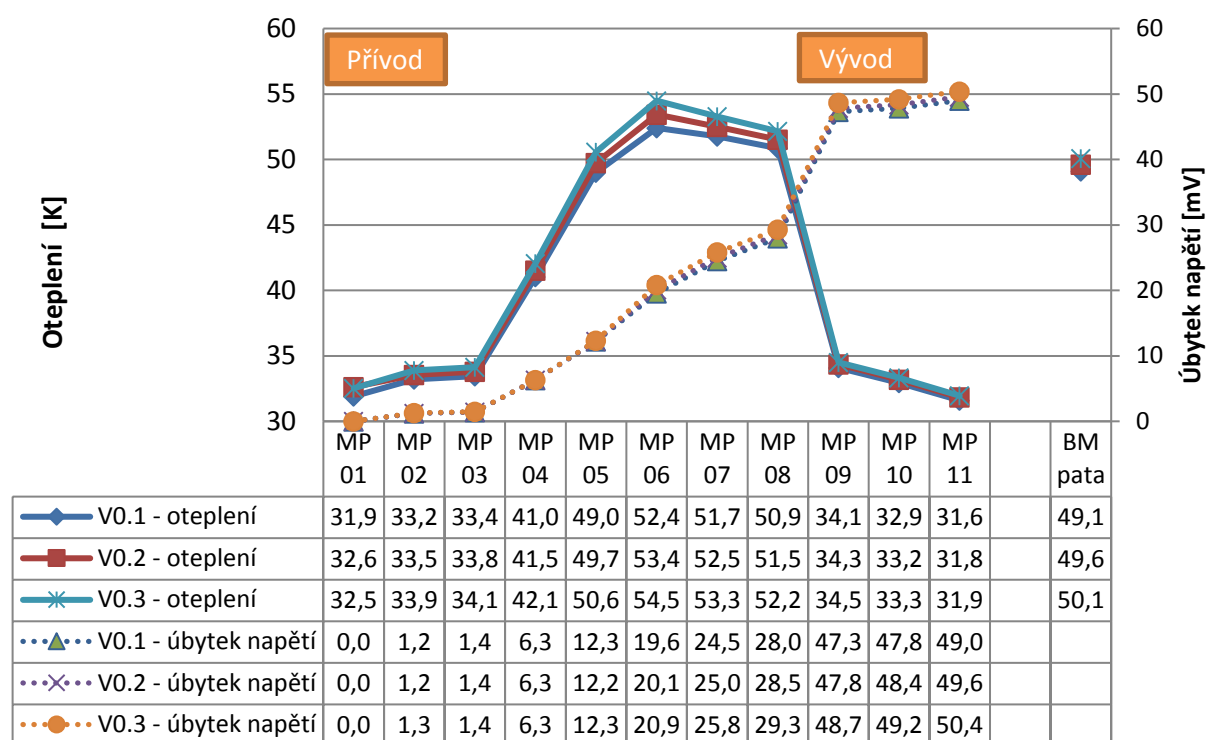
jednotlivé verze modelů. Nosič pevného kontaktu zůstane nezměněn a je pouze zaměněno kontaktní ramínko.

Tabulka 2: Verze modelů s různým kontaktním ramínkem – porovnání.

Verze modelu	Nosič pevného kontaktu - zátěž	Nosič pevného kontaktu - přívod	Kontaktní ramínko
V0.1			
V0.2			
V0.3			

Lze předpokládat, že žádná z navržených verzí nemá mít při jmenovitém zatížení přístroje větší odchylku oteplení. Navržené průřezy kritického dílu mají dostatečný průřez pro dnové dráhy. Jelikož je ramínko z obou stran zahříváno, nelze zajistit odvod tepla vedením. Verze V0.1 je základní verzí modelu, který má o trochu více materiálu na koncích ramínka, v blízkosti pohyblivého kontaktu. Je to z toho důvodu, že se předpokládá vliv vlastní tepelné kapacity materiálu kontaktní páky při přetížení. Toto vylepšení je bohužel negativní při zkratových zkouškách přístroje. Ramínko je na konci páky těžké což může zapříčinit pomalejší nadskok kontaktu v případě zkratu (jedná se o omezující jistič). U verze V0.3 je proto navrženo odlehčení ramínka pro potřebu lepších funkcí při výkonových zkouškách. Kompromis těchto potřeb je u modelu V0.2.

Výpočet je proveden pro jmenovité zatížení přístroje 250 A, při teplotě okolí 40 °C.



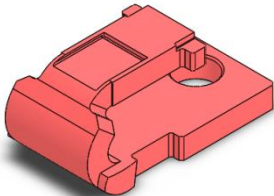
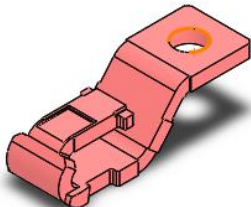
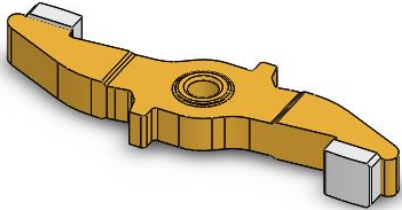
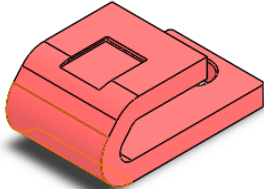
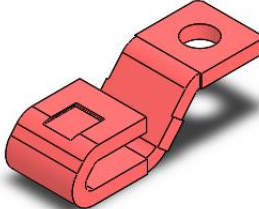
Obrázek 18: Porovnání numerických modelů pro různé varianty kontaktního ramínka – ustálený stav.

Při porovnání vypočítaných hodnot lze konstatovat, že vliv na ustálenou hodnotu oteplení elektrického přístroje je u těchto modelů minimální a hlavní roli při výběru geometrie hraje chování přístroje při přetížení. Teoretický předpoklad před provedením výpočtu se tak potvrdil. Obrázky numerického výpočtu pro různé varianty kontaktního ramínka v ustáleném stavu jsou uvedeny v příloze na str. 81.

Poslední sadou modelů je porovnání předložené geometrie nosičů pevných kontaktů. Tato varianta se použije, pokud se rozhodne, že do pól kazety se nezavede speciální železný element pro vytlačování elektrického oblouku z pevného kontaktu směrem ke zhášecím komorám. Toto vylepšení napomáhá zmenšit erozi materiálu na pevném kontaktu.

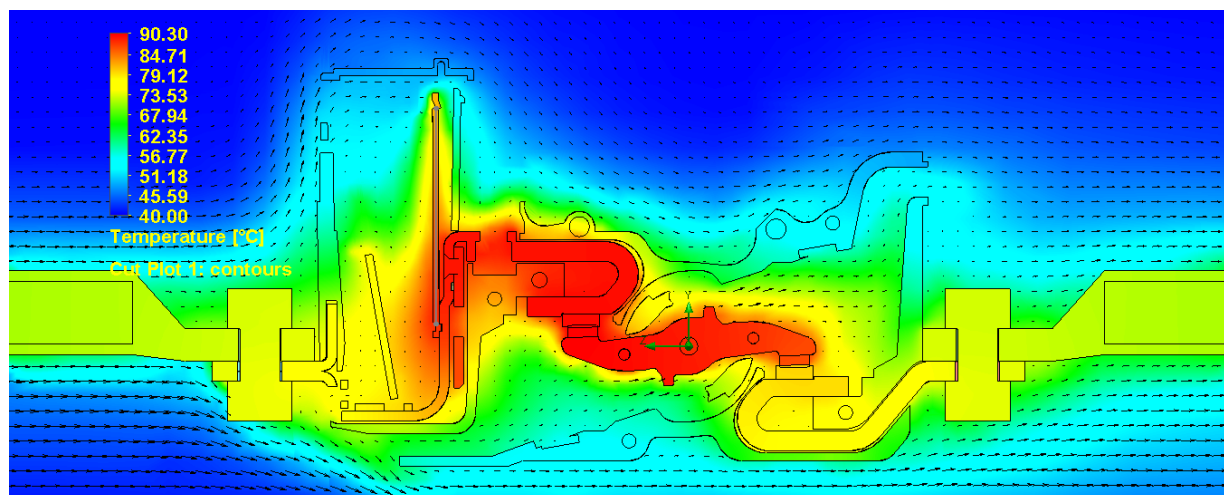
Pro zjednodušení jsou v následující tabulce graficky vyobrazeny jednotlivé díly modelů. Numerický výpočet pro zjednodušení uvažuje pouze základní verzi kontaktního ramínka, neboť předchozí simulace potvrdila, že v ustáleném stavu nemají tyto geometrie mezi sebou větší odchylku.

Tabulka 3: Verze modelů s různým nosičem pevného kontaktu - porovnání

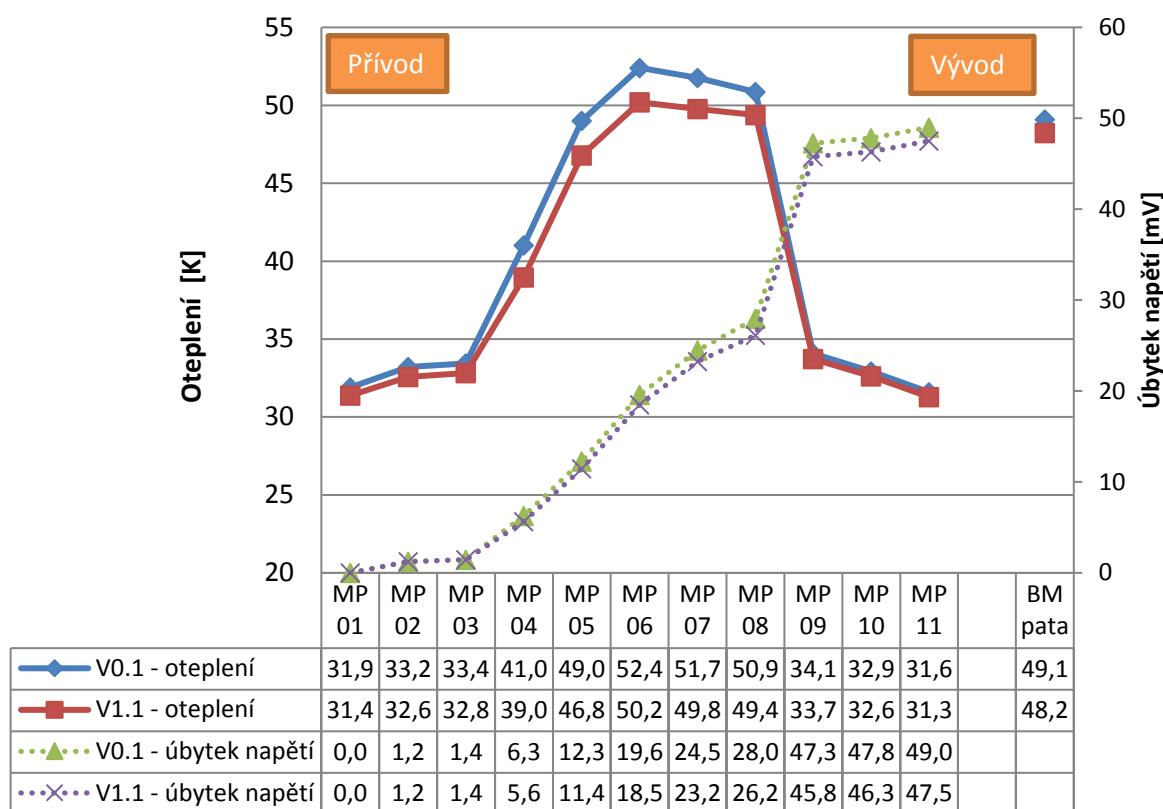
Verze modelu	Nosič pevného kontaktu - přívod	Nosič pevného kontaktu - zátěž	Kontaktní ramínko
V0.1			
V1.1			

Zjednodušení geometrie nosičů pevného kontaktu je markantní a nárůst objemu použitého materiálu na straně přívodu je o 25,5 % a na straně vývodu o 16,8 %.

Výpočet je proveden pro jmenovité zatížení přístroje 250 A při teplotě okolí 40 °C.



Obrázek 19: Rozložení teploty na zjednodušeném modelu V1.1 včetně proudnic, 250 A – řez.



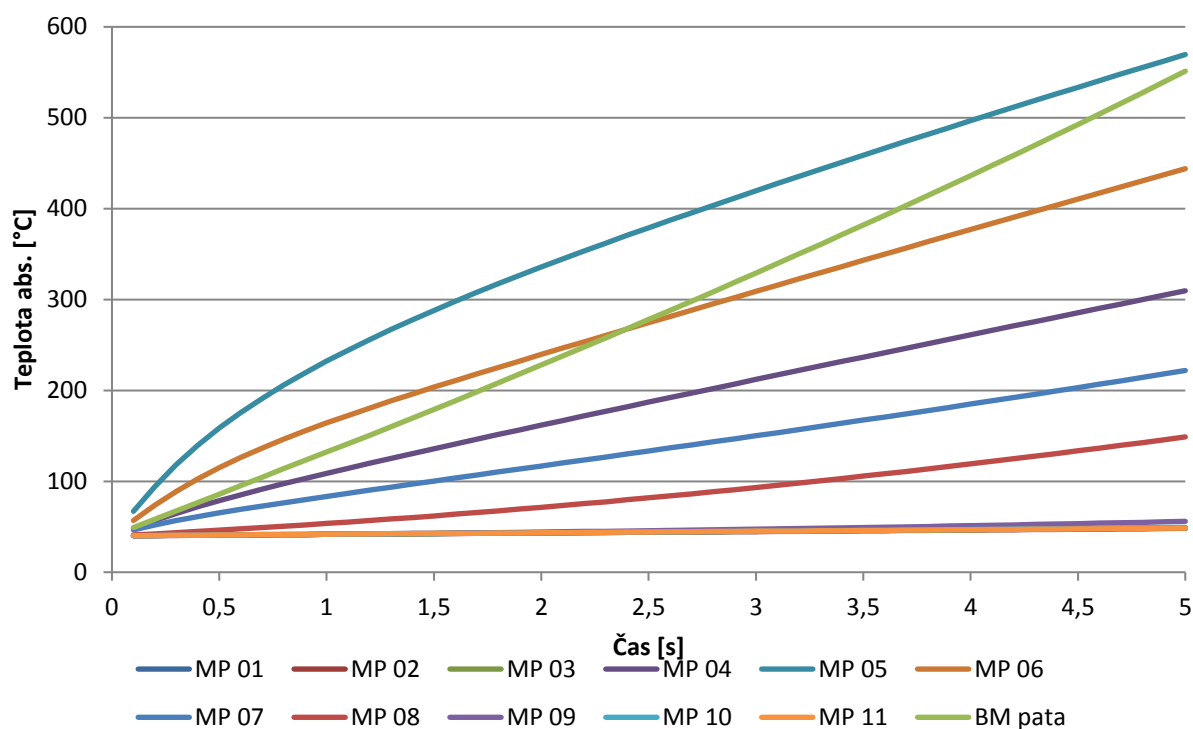
Obrázek 20: Porovnání oteplení proudových drah modelů verze V1.0 a V1.1, 250 A.

Dle rozložení grafu je zřejmé, že pokud by bylo možné použít zjednodušenou geometrii modelu V1.1, bude díky navýšení objemu jednotlivých částí poníženo oteplení na kontaktním ramínku o 4,4 %. Tento pokles nadále způsobí ponížení sledovaného oteplení na přívodních svorkách o 1,4 % a o 1,2 % na vývodních svorkách. Ochlazení na straně zátěže není tolik patrné, neboť je zde ovlivněno topítkem bimetalové spouště. Navýšení objemu jednotlivých částí je patrné i na křivce, která popisuje úbytek napětí na jednotlivých bodech přístroje.

4.4 Porovnání navržených komponentů při přetížení

Nejdůležitější zkouškou přístroje je jeho tepelná odolnost při přetížení. Přístroj a jeho tepelná spoušť musí odolat tepelným účinkům elektrického proudu až do maximální hodnoty zkratové spouště. Tu je možné v tomto případě nastavit až na $10 \times I_n$ (2500 A). Požadovaný vypínací čas tepelné spouště při tomto přetížení je kolem 3,5 sekund a odolnosti spínacího mechanismu do 4 sekund.

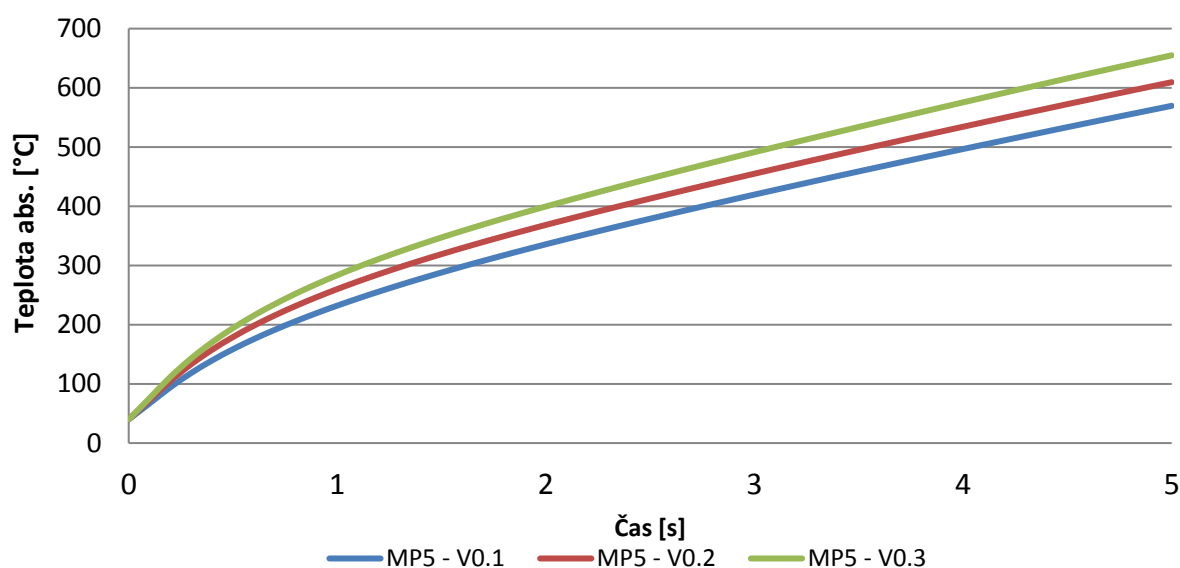
Pro zjednodušení výpočtu postačí porovnat jednu hodnotu přetížení, např. tedy požadovanou hodnotu $10 \times I_n$ na základním modelu V0.1.



Obrázek 21: Oteplovací křivka modelu V0.1 při přetížení $10 \times I_n$.

Dle výsledku numerického výpočtu je nejkritičtější místem proudové dráhy v tomto případě bod MP 05. Tento bod je totiž nejteplejší, což je způsobeno vlastním provedením zapínacího mechanismu. Táhlá ovladačího mechanismu působí pouze na jednu stranu kontaktního ramínka a na druhou stranu je tato síla přenášena pomocí osy, která je uložena v těžišti. Vlivem tolerancí se dá předpokládat, že na druhý kontakt působí menší síla než na ten první. Dalším vlivem, který může mít vliv na přitlačnou sílu kontaktů, je tolerance pružin, které jsou na kontaktním ramínku nainstalovány a zabezpečují (spolu s rotorovou základnou) funkci omezujícího jističe.

Je tedy nutné porovnat oteplovací křivky ostatních modelů na měřicím bodě MP 05.



Obrázek 22: Oteplovací křivka měřicího bodu MP 05 pro různé verze modelů při $10 \times I_n$.

Z oteplovacích křivek v předchozím grafu je jasně patrné, že teoretické předpoklady, které jsou popsány na začátku této kapitoly, byly správné a záleží na objemu ramínka v blízkosti pohyblivého kontaktu. V tomto bodě totiž není možné při přetížení dostatečně odevzdávat teplo do okolí a pouze vlastní tepelná kapacita materiálu v dané oblasti má za následek, že ke kritické teplotě 500 °C dojde později.

Dosažení kritické teploty na kontaktním ramínku dojde u modelu verze V0.1 za 4,05 sekund. oproti tomu, verze V0.2 byla rychlejší o 14 % a verze V0.3 dokonce o 30,6 %. Splnění předběžných požadavků odolnosti kontaktního ramínka vyhovuje pouze verze V0.1.

Z tohoto důvodu se simulace přetížení provedou pouze pro sestavu V0.1 a V1.1, neboť tepelná spoušť přístroje nedokáže ochránit ostatní kontaktní páky před zničením od teplotních účinků přetížení.

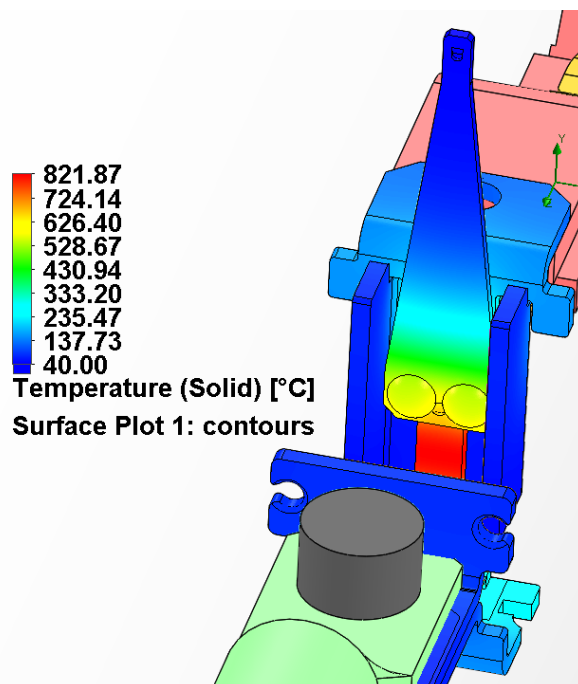
Výsledky numerických výpočtů jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 4: Porovnání modelů proudové dráhy jističe se jmenovitým zatížením 250 A.

$\times I_n$	Čas [s]			
	500 °C na kontaktním ramínku		Vypínací čas spouště	Delta
	Model V0.1	Model V1.1		[%]
6	21,6	30,3	10	40
8	8,2	10,4	5,0	27
10	4,0	5,0	3,5	25

Analýza numerických modelů při přetížení zjistila, že oba modely vyhovují požadavkům a pro všechny případy přetížení je zde dostatečná rezerva.

Zajímavostí je, že na patě bimetalu se od cca $8 \times I_n$ taktéž objeví zvýšená hodnota oteplení. Pokud je provedena podrobná analýza v oblasti topítka, je zjištěno, že ve zúžené části dochází při $10 \times I_n$ po 5 s k nárůstu teploty až k hodnotě kolem 800 °C. Lze tedy předpokládat, že za určitých podmínek může dojít k přetavení proudové dráhy přístroje. Podrobná studie oteplení je na následujícím obrázku.



Obrázek 23: Studie oteplení topítka modelu V1.1.- $10 \times I_n$ v čase 5 s.

Pokud se správně zkalibruje tepelná spoušť, tato teplota se zde nikdy neobjeví.

Vedení vývojového týmu se rozhodlo, že do pólkazet je zapotřebí doplnit kovový prvek pro ochranu pevného kontaktu – tzv. slot motor, a proto je vybrána geometrie modelu V0.1. Pokud by bylo možné využít neodlehčenou verzi přívodních pasů pevných kontaktů (model V1.1), bylo by možné zvýšit čas, za který dojde k dosažení kritické teploty 500 °C (bude vysvětleno v dalších kapitolách) a nemuselo by docházet k tak velkému tepelnému namáhání jednotlivých částí přístroje. Pokud by vybraný model nedokázal adekvátně spolupracovat s tepelnou spouští, nebo pokud by byl vznesen požadavek na zvýšení tepelné odolnosti přístroje během přetížení a zároveň nebylo možné zvýšit přtlak kontaktů a nemusel by se použít slot motor, lze tento model proudové dráhy využít. Nevýhodou tohoto návrhu je zvýšená spotřeba materiálu na vlastní proudovou dráhu.

Teplotní křivky z numerických modelů při přetížení lze nalézt v příloze na str. 83.

5 MĚŘENÍ OTEPLENÍ VÝKONOVÉHO JISTIČE

Teplota je stavová veličina, která charakterizuje stav termodynamické rovnováhy uvažované soustavy (tělesa). Je to objektivní hodnota určující tepelný stav látky. Teplotu lze měřit pomocí různých metod, v technické praxi jsou nejčastěji používány následující možnosti:

1. Bezdotykové teploměry

Každé těleso o určité teplotě emituje podle Stefan-Boltzmannova zákona tepelné záření. Infračervený bezdotykový teploměr, někdy též pyrometr, je založen na principu měření množství takto vyzařené energie v infračerveném spektru. Protože Stefan-Boltzmannův zákon platí pro černá tělesa, zavádí se pro reálná tělesa veličina emisivity. Emisivita je poměr mezi vyzařováním reálného tělesa a černého tělesa při stejné teplotě. U reálných těles je navíc nutno přihlídnout k jejich průhlednosti a odrazivosti. U průhledných materiálů se přesnosti dosahuje spektrální filtrací, např. sklo se chová neprůhledně pro vlnovou délku 5 μm . U odrazivých materiálů dochází k měření nejen vlastního, ale i odraženého záření [15].

2. Kovové odporové teploměry

Tento teploměr je založený na změně elektrického odporu kovu se změnou teploty. Tato závislost může být vyjádřena vztahem:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (25)$$

kde R_t je odpor při teplotě t , R_0 je odpor při nulové teplotě a α (K^{-1}) je teplotní součinitel odporu.

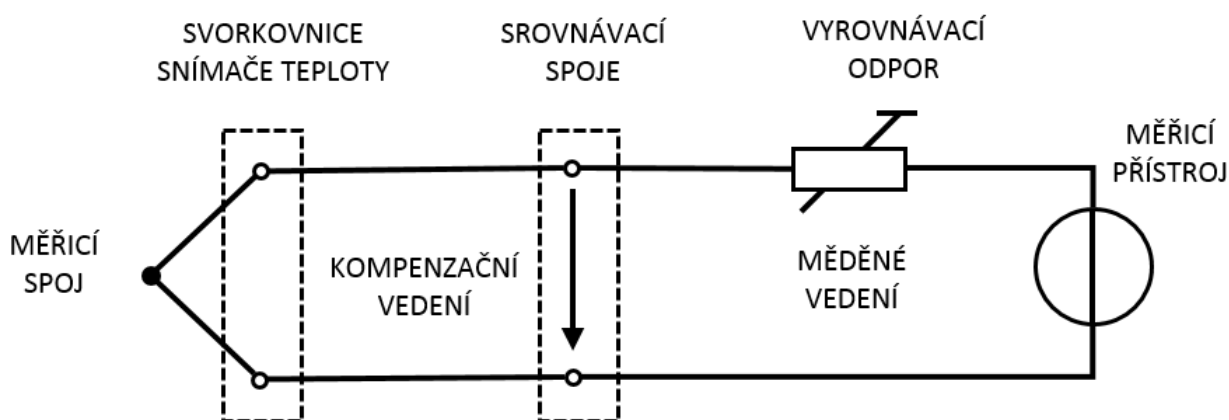
Výhodou tohoto typu teploměru je linearita měření ve velkém rozsahu teplot a snadné vyhodnocení. Nejpoužívanější je platinový teploměr, který změří teplotu v rozsahu od $-100\text{ }^\circ\text{C}$ do $440\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž měří s přesností na tisíce stupňů. Tento typ teploměru je používán nejméně v technické praxi a často bývá součástí složitějších měřících zařízení (např. jako snímač na měření referenční teploty termočlánekových sond) [15].

3. Termočlánky

K převodu teploty na elektrické napětí se využívá termoelektrického jevu. Z elektrického hlediska je termočlánek aktivním zdrojem elektrické energie o téměř nulovém vnitřním odporu a velmi malém svorkovém napětí. Proto jde o velmi rozšířenou metodu, zejména při požadavku velmi širokého rozmezí měřených teplot a pro měření vysokých teplot ($-600 - 2800\text{ }^\circ\text{C}$). Měřicí rozsah jednotlivých typů termočláneků je uveden v tabulce níže a následně doplněn o obrázek se základním zapojením termočláneků. Dle normativních požadavků je použití termočláneků v řadě případů pro měření oteplení přímo předepsáno, a proto čidla založená na tomto principu byla využita u všech experimentů.

Tabulka 5: Měřicí rozsah termočlánků.

Typ termočlánku	Kombinace kovů	Měřicí rozsah [°C]
T	Cu + CuNi	-200 až 400
J	Fe + CuNi	-200 až 760
E	NiCr + CuNu	-100 až 700
K	NiCr + NiAl	-200 až 1000
S	PtRh10 + Pt	0 až 1300
R	PtRh13 + Pt	0 až 1300
B	PtRh36 + PtRh6	300 až 1600
A	WRe5 + WRe20	0 až 2500
N	nicrosil + nisil	-270 až 1370



Obrázek 24: Základní zapojení termočlánku.

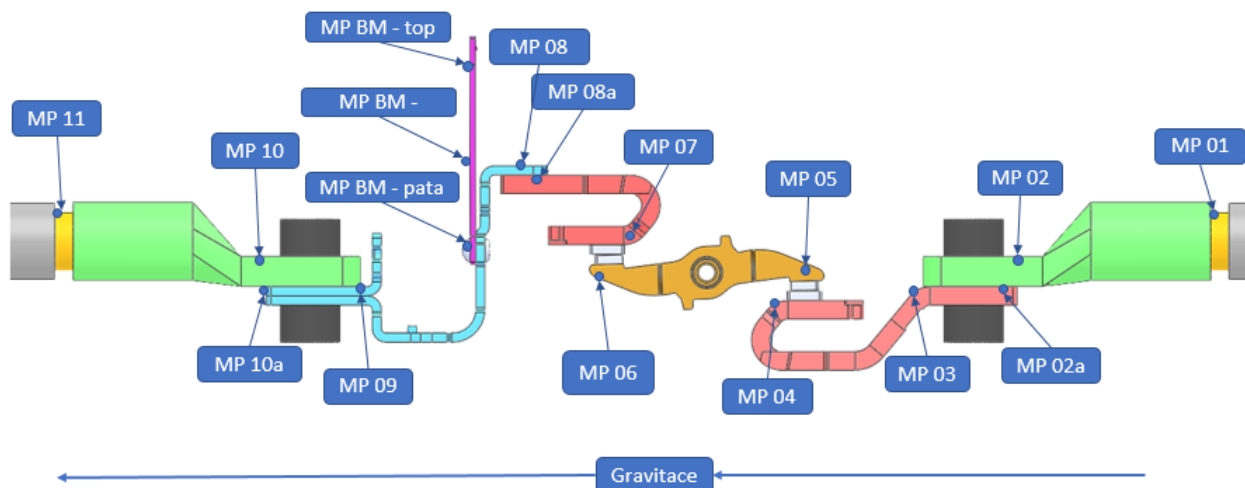
5.1 Instalace termočlánku

Nejdůležitějším bodem přípravy testu pro všechna provedená měření v rámci této práce je správný výběr a instalace termočlánků na proudovou dráhu jističe, včetně záznamu.

Samostatné ukládání naměřených hodnot je zajištěno pomocí moderních měřicích ústředí od společnosti AHLBORN. Tyto moderní ústředny mohou měřit až s 90ti druhy snímačů s využitím až 100 měřicích kanálů. Pro měření v rámci této práce postačí pouze záznamy oteplení jednotlivých termočlánků, protékající proud jističem a úbytek napětí na svorkách jednotlivých pólů.

Předpokládá se, že v ustáleném stavu teplota na tomto přístroji nepřesáhne 200 °C a při měření oteplovací křivky při přetížení je test ukončen dosažením teploty cca 600 °C, proto se jako nejvhodnější použije termočlánek typ J (železo - konstantan) anebo typ K (chromel-alumel).

Pro porovnání vypočítaných hodnot spolu s naměřenými jeví se jako nejžádanější poloha pro umístění termočlánků vybrat stejné nebo přibližně stejné polohy. Z tohoto důvodu je na samotné proudové dráze přístroje vybráno 10 měřicích bodů (MP), které jsou doplněny o další 3 měřicí body na samotném bimetalovém pásku a další 2 na kabelovém oku spolu s žilou měděného vodiče. Celkový počet termočlánků, jenž je zapotřebí odborně nainstalovat na jeden pól jističe, je tak 17, viz následující obrázek:



Obrázek 25: Umístění termočlánků, které je shodné s měřicími body v numerickém výpočtu.

Celkový počet nainstalovaných termočlánků pro měření na třífázovém jističi je 51 plus 2 termočlánky pro měření teploty okolí během zkoušek.

Nejrizikovější polohou termočlánku je poloha MP 05 a MP 06 na ramínku umístěném v pól kazetě, a to ze tří příčin:

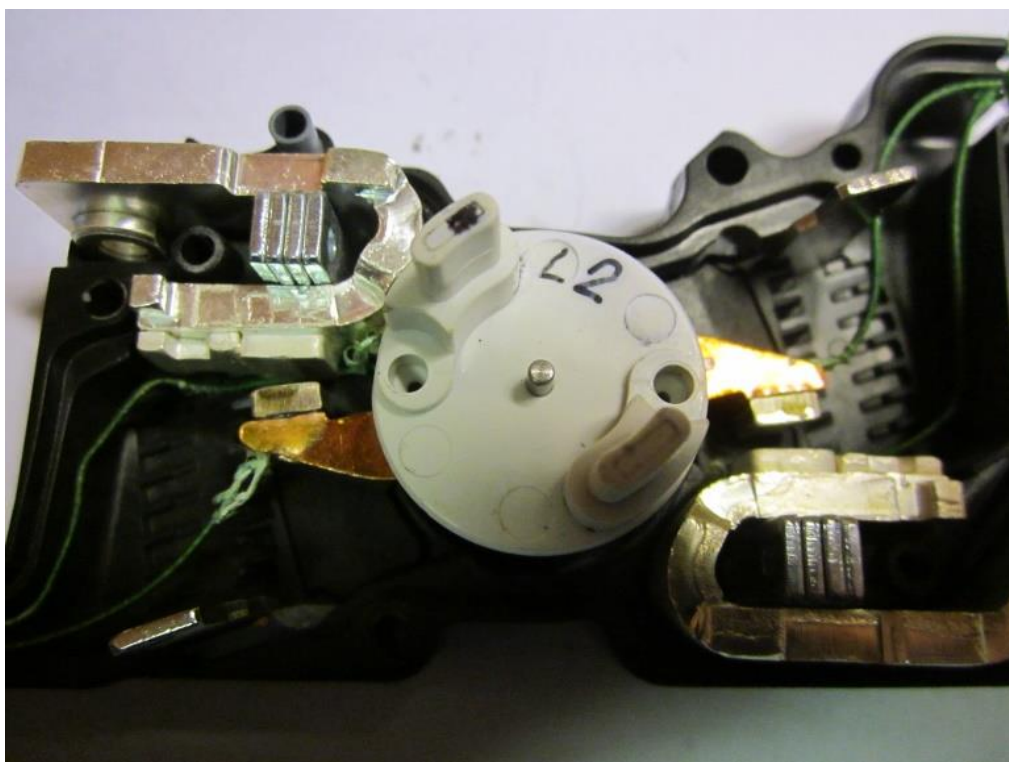
1. Pro zapnutí jističe je zapotřebí nastřádat spínací systém jističe (jeho funkci je rychlé zapnutí a vypnutí popř. vybavení jističe), a proto jsou jeho pružiny velmi silné. Při nastřádání těchto pružin dojde k plnému otevření kontaktů a přesně v poloze instalace termočlánků se samotné ramínko opře o pól kazetu, což může vést k poškození termočlánku.
2. Při zapnutí jističe opět působí pružiny spínacího systému na vlastní ramínko (přes rotor) a to takovou silou, že po době zvratu dojde k zapnutí jističe za pouhých 6 ms. Účinek síly, která v takto krátké době začne působit na spoj termočlánku s ramínkem, je obrovský.
3. Po sepnutí kontaktů začne na spoj termočlánku působit opačná síla z důvodu vlastní setrvačnosti ramínka a může opět dojít k utržení termočlánku, neboť použité materiály jsou křehké.



Obrázek 26: Instalace termočlánku na kontaktní páku jističe (vlevo – strana přívodu, vpravo strana vývodu).

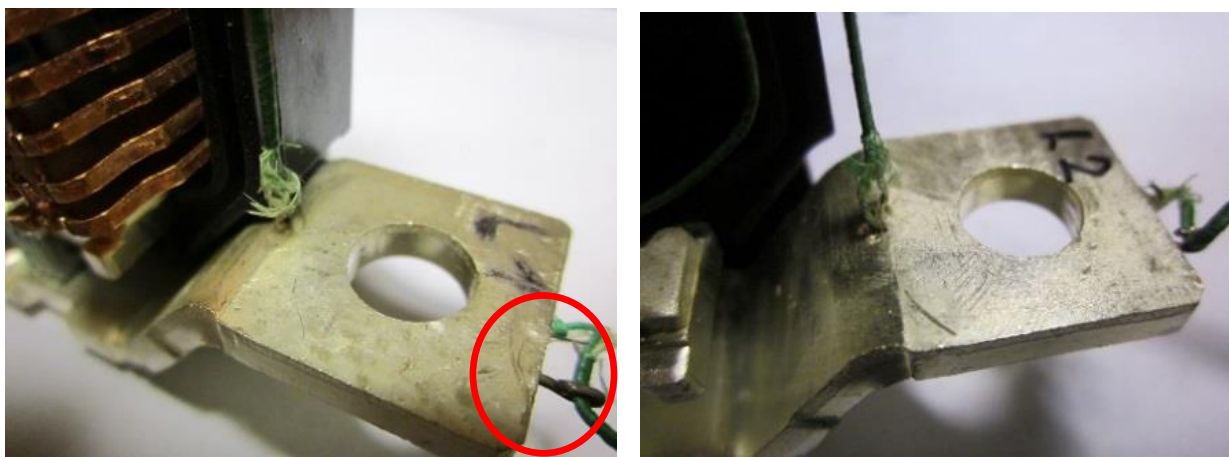


Obrázek 27: Instalace termočláňku na nosič pevného kontaktu (vlevo přívod a vpravo vývod).



Obrázek 28: Instalace termočláňku - pohled na celou sestavu pól kazety - prostřední pól.

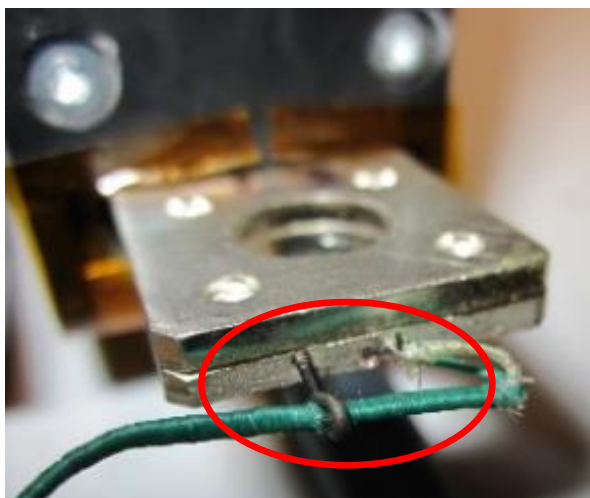
Na Obrázku 28 je vidět, jak obtížná instalace byla provedena uvnitř pólkazety. Kontrolu funkčnosti termočláňku je možné provést až po kompletním složení a zapnutí jističe.



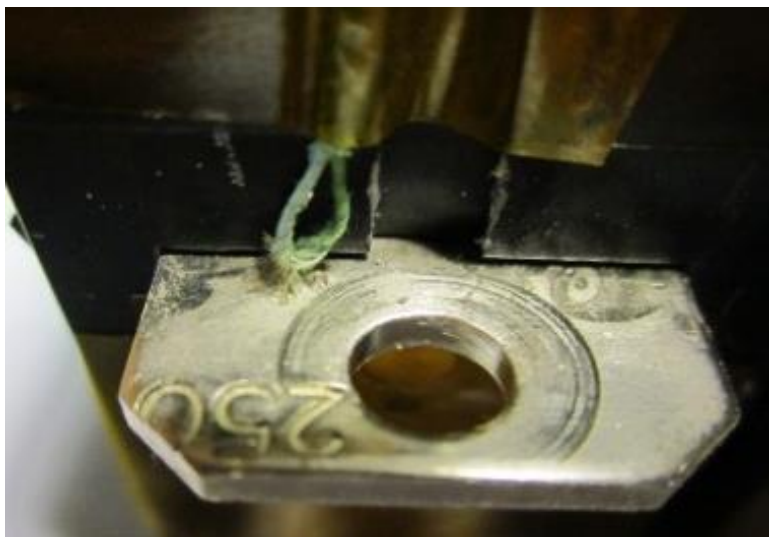
Obrázek 29: Instalace termočlánků na přívodní svorku L1 a L2 (linde side).

Na Obrázku 29 a 30 je detail přichycení termočlánku, který by mohl být při manipulaci poškozen, a to by mohl být problém. Oprava jakéhokoli termočlánku může být totiž velice komplikovaná a hrozí poškození dalších termočlánků, zejména pokud je nutné provést operaci zapnout – vypnout.

Metoda instalace, která je ve větší míře při připojení termočlánku k měřené části použita, je „zaťukávání“, což je vyhodnoceno jako jedno z nejlépe „trvanlivých“ řešení doporučovaných odborníky. Druhým častým způsobem instalace je lepení. To však někdy nemusí být šťastné řešení, neboť tato metoda nesplňuje tvrdé požadavky, které jsou na instalaci u jisticích přístrojů kladeny a vlivem vibrací při zapnutí jističe mohou termočlánky upadnout. Další detail lze vidět na Obrázku 30: vývodová svorka spouště a ukotvení termočlánku.



Obrázek 30: Instalace termočlánku na vývodní svorku spouště jističe včetně detailu zafixování termočlánku.



Obrázek 31: Instalace termočlánků na topítko spouště (vlevo na přívodní pas, vpravo na patu bimetalu).

Po kompletní instalaci všech 13 termočlánků použitých v jednom pólu je přístroj připraven pro experiment. Další 4 termočlánky jsou instalovány na vodičích. Pro správné složení 3f jističe moderní modulární koncepce je zapotřebí prostřední pól kazetu se spínacím mechanismem propojit s dalšími dvěma a celou tuto sestavu následně uložit do plastové základny a ukotvit všechny vložené součásti, včetně vrchního krytu. Pouze tímto postupem je zaručen přenos sil ovládacího mechanismu na kontaktní páku silových kontaktů.

5.2 Metodika zkoušení podle normy ČSN

Jisticí přístroj nízkého napětí musí, jako každé elektrické zařízení, které je uvedeno na trh, získat certifikaci. Po novelizaci zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky je podle dohody PECA (Protocol to the Europe Agreement establishing an Association between the European Communities and their Member States of the one part, and the Czech Republic, of the other part, on Conformity Assessment and Acceptance of Industrial Products) možné do států EU vyvážet výrobky, u kterých byla shoda prokázána podle tohoto zákona a samozřejmě i do ČR dovážet a to bez dodatečné certifikace českou stranou [17].

V České republice je jako jediný oprávněný orgán provádět certifikaci na elektrická zařízení Elektrotechnický zkušební ústav (EZÚ). Certifikát od EZÚ obdrží pouze ten výrobek, který úspěšně splní typovou zkoušku podle příslušných norem. U jisticích přístrojů nízkého napětí se jedná o normu ČSN EN 60947-1 Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 1: Všeobecná ustanovení a také o normu, která je přímo zaměřena na jisticí přístroje, což je norma ČSN EN 60947-2 Spínací a řídicí přístroje nn – Část 2: Jistič. Obě tyto normy jsou českou verzí evropských norem a překlad byl zajištěn Českým normalizačním institutem. Normy mají stejný status jako oficiální verze.

Jak již bylo uvedeno, každý přístroj musí projít pro získání certifikátu typovou zkoušku. Provedení těchto zkoušek je rozděleno do určitých zkušebních sledů – ty jsou podrobně popsány v příslušné normě výrobku a těmto musí být dané zařízení podrobeno. Na provedení těchto zkoušek jsou

kladeny určité všeobecné podmínky a jako nejdůležitější z nich se jeví podle normy ČSN EN 60947-1 (dále jen normy) následující:

1. Zařízení, které má být podrobeno zkoušce, se musí ve všech podstatných detailech shodovat s typovým provedením, které reprezentuje.
2. Pokud příslušná norma výrobku nestanoví jinak, každá zkouška (jednotlivá nebo sled zkoušek) musí být provedena na novém a čistém zařízení.
3. Kompletní zkoušené zařízení musí být namontováno na vlastní stojan nebo na stojan ekvivalentního provedení a připojeno jako v normálním provozu podle pokynů výrobce.
4. Utahovací krouticí momenty, které mají být použity pro šroubové svorky, musí odpovídat pokynům výrobce.
5. Zařízení se zkouší buď v nejmenším z předepsaných krytů, nebo, pokud tento není předepsán, zařízení musí být zkoušeno ve volném prostoru. Pokud mohou být taková zařízení použita rovněž ve stanovených samostatných krytech a byla zkoušena ve volném prostoru, musí být dodatečně zkoušena v nejmenším z takových krytů stanovených výrobcem pro specifické zkoušky, které musí být stanoveny v příslušné normě výrobku a uvedeny ve zkušební protokolů.
6. Údržba nebo výměna částí není dovolena, pokud příslušná norma výrobku nestanoví jinak.
7. Při zkouškách musí být ovládací systém mechanických spínacích přístrojů ovládán tak, jako při zamýšleném použití v provozu stanoveném výrobcem a při jmenovitých hodnotách ovládacích veličin (jako je napětí nebo tlak), pokud není v této normě nebo v příslušné normě výrobku stanoveno jinak [1].

Hlavním zaměřením této části práce je oteplení kritických částí přístroje, zejména proudovodné dráhy. Tomu se věnuje článek 8.3.3.3 všeobecné normy, kde jsou již podrobněji popsány vlastní podmínky zkoušky. Podle článku 8.3.3.3.1 všeobecné normy je zde vypsán požadavek na *Teplotu okolního vzduchu*:

Teplota okolního vzduchu musí být v průběhu poslední čtvrtiny zkušební doby zaznamenávána alespoň dvěma snímači teploty, například teploměry nebo termočlánky, rozmístěnými rovnoměrně kolem zařízení zhruba v polovině jeho výšky a ve vzdálenosti asi 1 m od zařízení. Snímače teploty musí být chráněny před prouděním vzduchu, sáláním tepla a proti chybám indikace způsobeným náhlými změnami teploty [1].

Během zkoušky se musí teplota vzduchu pohybovat v rozmezí od +10 do +40 °C a nesmí se změnit o víc než 10 K.

V následujícím článku všeobecné normy 8.3.3.3.2 – *Měření teploty částí*, je popsáno, že by se měla teplota různých částí měřit vhodnými snímači, a to na těch místech, které mají s největší pravděpodobností nejvyšší teploty, přičemž by vždy mělo dojít k zaznamenání teploty těchto bodů. Nejdůležitější informací tohoto článku normy je, že zkouška musí probíhat po dobu, která je dostatečná k tomu, aby oteplení dosáhlo ustálené hodnoty, nikoliv však déle než 8 hodin. Předpokládá se, že ustáleného stavu je dosaženo, když změna není větší než 1 K za hodinu [1].

Článek všeobecné normy 8.3.3.3.3 – *Oteplení části* popisuje rozdíl mezi teplotou části měřenou podle článku 8.3.3.3.2 všeobecné normy a *Teplotou okolního vzduchu* měřenou podle článku 8.3.3.3.1 všeobecné normy.

Nejdůležitější částí této všeobecné normy je článek 8.3.3.3.4 - *Oteplení hlavního obvodu*. Zde je vypsán výčet podmínek a pravidel, jak by zkoušené zařízení se jmenovitým proudem 250 A mělo být zapojeno a testováno:

1. Zařízení musí být namontováno tak, jak uvádí výrobce, a musí být chráněno proti nadměrnému vnějšímu ohřívání nebo ochlazování.
2. Pro zkoušky s vícefázovými proudy musí být proud v každé fázi vyvážen v rozmezí $\pm 5\%$ a průměrná hodnota těchto proudů nesmí být menší než příslušný zkušební proud.
3. Zkoušky zařízení, která jsou určena pro stejnosměrný proud, mohou být, pokud je to z hlediska zkoušení výhodné, provedeny se střídavým napájením, avšak pouze se souhlasem výrobce.
4. V případě vícepólových zařízení vybavených stejnými póly a zkoušených střídavým proudem může být zkouška se souhlasem výrobce provedena jednofázovým proudem se všemi póly zapojenými do série za předpokladu, že je možné zanedbat magnetické vlivy.
5. V závislosti na hodnotě smluveného tepelného proudu (ve volném prostoru nebo v krytu) musí být pro zapojení při zkoušce použito jedno z následujících uspořádání:
 - a) Pro hodnoty zkušebního proudu do 400 A včetně:
 - i. Zapojení musí být provedeno jednožilovými měděnými vodiči s izolací PVC a průřezy uvedenými v tabulce příslušné normy.
 - ii. Spoje musí být vedeny ve volném prostoru a musí být rozmístěny v přibližně stejné vzdálenosti, jako je vzdálenost mezi svorkami.
6. U jednofázových nebo vícefázových zkoušek musí minimální délka jakéhokoli provizorního spoje od svorky zařízení k jiné svorce, nebo ke zkušebnímu zdroji, nebo ke společnému bodu při zapojení do hvězdy činit: 2 m pro průřezy větší než 35 mm².

Jako jeden z bodů zkušebního sledu typové zkoušky je zkouška oteplení svorek:

Tabulka 6: Mezní hodnota oteplení svorek podle všeobecné normy ČSN EN 60947-1.

Materiál svorky	Mezní hodnota oteplení [K]
Holá měď	60
Holá mosaz	65
Pocínovaná měď nebo mosaz	65
Postříbřená nebo poniklovaná měď nebo mosaz	70
Jiné kovy	65
Mezní hodnoty oteplení mohou být patřičnou normou výrobků, za určitých podmínek, o více než 10 K vyšší. To však neplatí pro nové jističe.	

Mezní hodnoty oteplení, které jsou uvedeny v této tabulce, platí pouze pro zařízení zkoušené v novém a čistém stavu. Zkoušený přístroj nesmí přesáhnout tyto hodnoty na svorkách přístroje.

Ostatní části přístroje se musí řídit následujícím kritériem:

Tabulka 7: Mezní hodnoty oteplení přístupných částí podle všeobecné normy ČSN EN 60947-1.

Přístupné části	Mezní hodnoty oteplení [K]
Ruční ovládací prostředky - nekovové	15
Části určené k dotyku (nikoliv k držení v ruce) -nekovové	40
Části, kterých se není třeba dotýkat za normálního provozu - nekovové	50
Mezní hodnoty oteplení mohou být patřičnou normou výrobků, za určitých podmínek, o více než 10 K vyšší. To však neplatí pro nové jističe.	

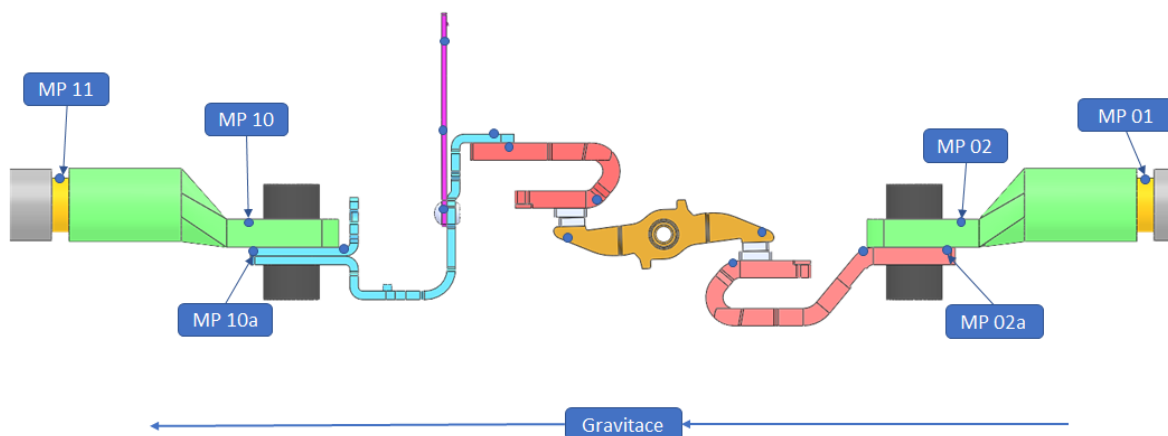
Jestliže nyní jsou známy veškeré požadavky, které jsou kladeny na nový přístroj, lze tuto zkoušku provést. Nejdříve je však nutné provést oteplovací zkoušku na samotném vzorku. Tedy před instalací termočlánků a ověřit, zda nedojde k ovlivnění měření.

5.2.1 Oteplovací zkouška přístroje před instalací termočlánků

Jak je uvedeno v minulé kapitole, je zapotřebí zjistit, zda nedojde při instalaci termočlánku k porušení jednotlivých částí, které mohou oteplovací zkoušku ovlivnit. Přístroj má jmenovitou hodnotu proudu stanovenou výrobcem na 250 A a využívá pro vybavení nadproudu termomagnetickou spoušť. Z tohoto důvodu je zapotřebí dodržet referenční hodnotu teploty okolí, která je stanovena na 40 °C. Nejjednodušším způsobem nastavení okolní teploty je použít speciální tepelnou komoru, která je pro tyto zkoušky přizpůsobena. Tato komora je vyrobena s dekádou přímotopných elektrických konvektorů, které jsou ovládány pomocí řídicí jednotky spolu s klimatizací, kdy čidlo teploty okolí je umístěné ve výšce zkoušence. Charakteristikou této tepelné komory je zamezení nuceného proudění vzduchu při chlazení, což je normou zakázáno.

I když bylo na celém pólu proudové dráhy vybráno celkem 17 měřicích bodů, před rozebráním jističe je možné se dostat dotykovým teploměrem pouze na některé z nich. Jako jednoduše dostupné body jsou vybrány:

- MP 01 – jádro přívodního vodiče,
- MP 02 – přívodní kabelové oko v blízkosti svorky přístroje,
- MP 10 – vývodové kabelové oko v blízkosti svorky přístroje,
- MP 11 – jádro vývodového vodiče.



Obrázek 32: Umístění měřicích bodů oteplení pro nový jistič.

Zkoušený přístroj je připojen do obvodu pomocí měděného, jemně laněného vodiče o průřezu 120 mm², který je na tuto hodnotu jmenovitého proudu jističe předepsán podle všeobecné normy s izolací PVC. Výrobce může definovat typ vodiče, ale nejnepříznivější bude u jemně laněného vodiče, neboť zde dochází k horšímu odvodu tepla, než u ostatních provedení. Dalším dostupným měřicím bodem je bod blízko svorky jističe. Zde je zapotřebí provést měření pro ověření oteplení z hlediska *Mezního oteplení svorek* dle všeobecné normy: Tabulka 6. Teplotní gradient, který zde vznikne, je v tomto případě téměř zanedbatelný.

Pro ověření úbytku napětí na svorkách jističe => proudové dráhy je zapotřebí zvolit bod přímo na svorkách (MP 02a + MP 10a). Je to z toho důvodu, že dojde k potlačení přechodového odporu mezi kabelovým okem a vlastní svorkou jističe. Tato hodnota pomůže ověřit, zda nedošlo k nějakému nežádoucímu jevu na kontaktním styku vlastního spínacího mechanismu.

Tabulka 8: Oteplovací zkouška jističe – nový jistič 250 A.

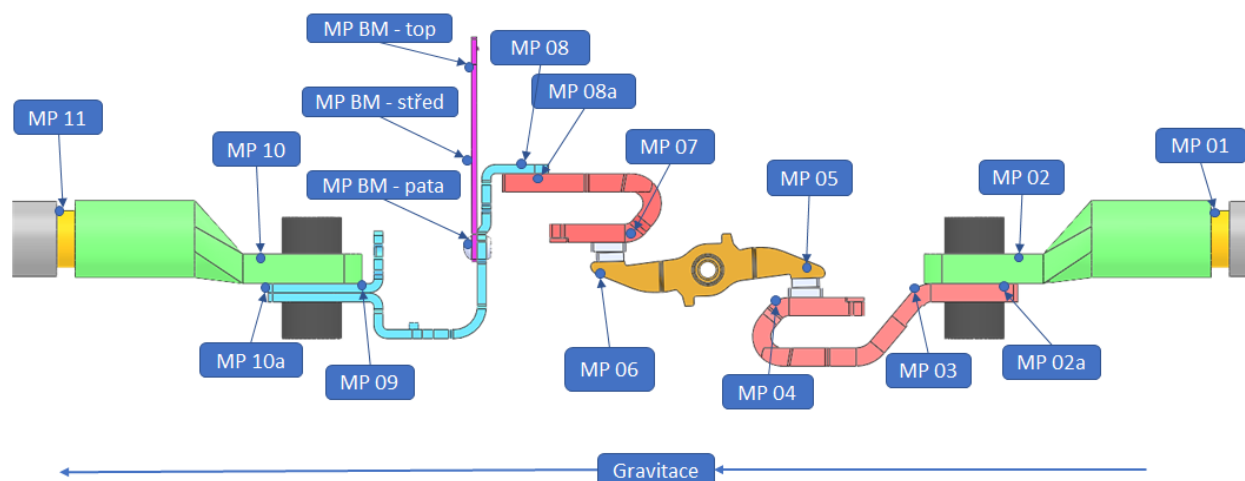
Popis polohy MP		L1	L2	L3
Přívodní kabel	MP 01	90 °C	91 °C	90 °C
Přívod - kabelové oko	MP 02	96 °C	96 °C	94 °C
Vývod - kabelové oko	MP 10	91 °C	94 °C	90 °C
Vývodový kabel	MP 11	87 °C	89 °C	85 °C
Úbytek napětí na svorkách jističe	MP 02a	87 mV	80 mV	79 mV
	MP 10a			
Teplota okolí		40°C		

Přívodní kabel	MP 01	51 K	52 K	50 K
Přívod - kabelové oko	MP 02	56 K	56 K	54 K
Vývod - kabelové oko	MP 10	51 K	54 K	50 K
Vývodový kabel	MP 11	47 K	49 K	47 K

Jelikož svorky spínacího přístroje jsou galvanicky pokovené stříbrem, lze podle normy akceptovat na měřicích bodech MP 02 a MP 10 (kabelové oko – označeno žlutě) hodnotu oteplení až 70 K. Podle naměřených hodnot v Tabulka 8 jistič vyhovuje těmto mezím. Rezerva pro dosažení kritické hodnoty se pohybuje od 14 do 20 K.

5.2.2 Oteplovací zkouška přístroje po instalaci termočlánků

Přístroj oteplovací zkoušce vyhověl, a proto jej lze nyní rozebrat na jednotlivé elementy a nainstalovat termočlánky, tak jak je popsáno v dřívější kapitole. Poloha měřicích bodů odpovídá fotodokumentaci z dřívější kapitoly:



Obrázek 33: Umístění všech měřicích bodů pro instalaci termočlánků.

Tabulka 9: Oteplení jističe 250 A po instalaci termočlánků.

Popis polohy MP		L1	L2	L3
Přívodní kabel	MP 01	47,6 K	49,6 K	45,5 K
Přívod - kabelové oko	MP 02	50,0 K	52,5 K	48,5 K
Přívodní svorka	MP 02a	50,8 K	52,9 K	47,1 K
Přívodní pas	MP 03	52,2 K	53,5 K	48,3 K
Přívodní pevný kontakt	MP 04	61,2 K	64,0 K	56,3 K
Přívodní pohyblivý kontakt	MP 05	82,3 K	78,6 K	69,3 K
Vývodový pohyblivý kontakt	MP 06	86,7 K	84,0 K	75,4 K
Vývodový pevný kontakt	MP 07	84,6 K	83,2 K	75,7 K
Vývodní vodič - svorka - pas	MP 08	82,1 K	81,2 K	74,7 K
Topítko - svorka - pas	MP 08a	81,9 K	81,1 K	74,5 K
Topítko - vývodní pas	MP 09	50,0 K	53,0 K	49,0 K
Vývodní svorka	MP 10a	49,4 K	52,3 K	48,8 K
Vývod - kabelové oko	MP 10	49,3 K	52,1 K	48,6 K
Vývodový kabel	MP 11	46,0 K	49,0 K	45,0 K
Bimetal	pata	79,0 K	80,0 K	72,0 K
	střed	75,7 K	76,1 K	67,7 K
	vrchol	73,0 K	73,0 K	66,0 K
Úbytek napětí na svorkách jističe	MP 02a	75 mV	66 mV	68 mV
	MP 10a			
Teplota okolí	26,0 °C			

Podle normy je možné zhodnotit, zda přístroj vyhoví oteplovací zkoušce, a to pomocí měřicích bodů MP 02 a MP 10 (kabelové oko – označeno žlutě) - akceptovat lze oteplení do 70 K. Jak je

zřejmé podle Tabulka 6, jistič je ve stále vyhovujícím stavu a tuto hodnotu nepřesahuje v žádném z testovaných pólů. Dosažení kritické hodnoty přístroje je s rezervou od 17,5 do 21,5 K.

Pravděpodobným důvodem snížení hodnoty oteplení přístroje je změna přechodového odporu na kontaktním styku přístroje. Podle měření došlo ke snížení úbytku napětí skoro o 14 % na fázi L1 i L2 a o 17,5 % na fázi L3 – tyto poklesy již nejsou zanedbatelné.

Kontakty při instalaci termočlánků se znečistily a bylo zapotřebí jejich očištění pomocí isopropylalkoholu. Odstraněné vrstvy nečistot a mastnota, která se zde dříve mohla nacházet a bránit odvodu tepla vedením, byly pravděpodobně zdrojem dodatečného tepla v důsledku zvýšeného přechodového odporu.

K zamyšlení je i oblast MP 02 ve fázi L3, zde místo toho, aby došlo ke klesajícímu gradientu teploty, je zde mírný nárůst. Ten by pravděpodobně mohl být způsoben špatným nalisováním kabelového oka a vodiče.

Po shrnutí celého měření lze považovat instalaci termočlánků za povedenou a v žádném případě nedošlo rozděláním jističe k ovlivnění oteplovací zkoušky. Dokonce lze konstatovat, že vyčištěním vnitřního prostoru pólkazet došlo ke zlepšení.

Nyní je zapotřebí změřit oteplení proudové dráhy jističe na jednotlivých částech, jak bylo popsáno dříve. Z určitých důvodů (díky malému teplotnímu gradientu) lze zanedbat měřicí body s přívlastkem *a*. Tyto body jsou nainstalované uvnitř přístroje pouze pro přesné měření přechodového odporu mezi šroubovými spoji.

Jako hlavní provozní stav jisticího přístroje lze označit smlouvenou hodnotu tepelného proudu. Tuto hodnotu lze označit i za jmenovitý proud jističe, avšak ta je splněna pouze za předpokladu dodržení doporučené teploty okolí. Jisticí přístroj je totiž postaven na konceptu termomagnetické spouště, kde vypínání malých násobků proudů (přetížení) zajišťuje bimetalový proužek. Výhodou tohoto řešení je velice nízká pořizovací cena a při dodržení základních fyzikálních zákonů i přesnost. Proto je výrobcem doporučená hodnota provozu stanovena teplota +40 °C. Na tuto teplotu je totiž tato spoušť kalibrována.

Pokud se tento přístroj používá za vyšších teplot okolí, musí se pomocí teplotního koeficientu jmenovitá hodnota proudu přepočítat na nižší hodnotu, avšak nesmí dojít k překročení mezní teploty okolí. Tento způsob kompenzace se nazývá „derating“ (z anglického jazyka). Při opačném problému, tedy chladném okolí, se musí jmenovitá hodnota proudu jisticího přístroje navýšit, provádí se „rerating“. Přístroj nemá kompenzaci na jinou teplotu okolí, a nefungoval by tedy spolehlivě v požadovaných mezích. Rozsah pracovního použití pro tento přístroj je od -25 °C až po + 70 °C.

Jmenovitá hodnota jisticího přístroje není fixní a lze ji pro určité normy USA (např. UL) ponížít až o 20 %, a pro evropské (EN normy) i o 30 %. Z tohoto důvodu je zapotřebí tyto provozní stavy také prověřit.

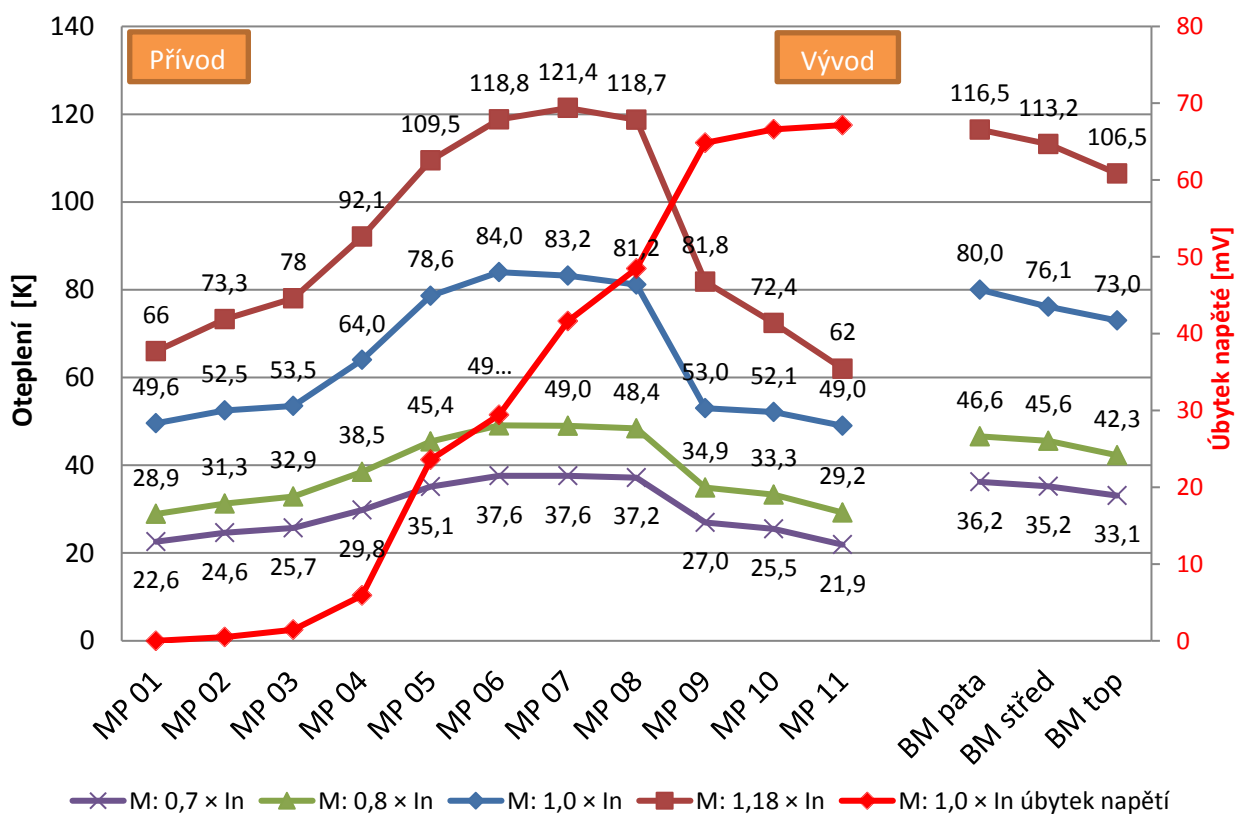
Poslední hodnotou, kterou je třeba změřit, je *ověřovací vypínací mez při přetížení*. Jisticí přístroje mají podle normy domluvený tzv. *smluvený vypínací a nevypínací proud*. Ten je popsán tak, že jisticí přístroj nesmí po dobu 2 hodin při $1,05 \times I_n$ vybavit, kdy měření začíná ze studeného stavu a následně dojde ke zvýšení proudu na $1,3 \times I_n$ a tento proud musí testovaný vzorek do 2 hodin vybavit. Ze zkušeností se ví, že teplota uvnitř jističe se při tomto testu nachází v okamžiku vybavení přibližně na hodnotě, která by odpovídala ustálené hodnotě při $1,18 \times I_n$.

Požadované hodnoty proudu pro oteplovací zkoušky v ustáleném stavu:

Tabulka 10: Požadované hodnoty proudu pro měření ustáleného stavu.

$I_n = 250 \text{ A}$	popis
$0,7 \times I_n$	Minimální hodnota nastavení tepelné spouště (EN)
$0,8 \times I_n$	Minimální hodnota nastavení tepelné spouště (UL)
$1,0 \times I_n$	Jmenovité zatížení
$1,18 \times I_n$	Předpokládaná teplota při vybavení přetížení
$1,3 \times I_n$	Dohodnutý vypínací proud

Jelikož se vyskytl problém s použitím záznamové stanice s termočlánky v tepelné komoře (40°C), jsou veškeré oteplovací zkoušky realizované při pokojové teplotě. Vliv na výsledky zkoušky jsou v tomto případě zanedbatelné.



Obrázek 34: Naměřené hodnoty oteplení při teplotě okolí $\sim 23-28^\circ\text{C}$ pro různé provozní stavy I_n .

Podle naměřených hodnot, které jsou shrnuty v předcházejícím grafu, je patrné, že ani v jednom z provozních stavů ($0,7 - 1,0 \times I_n$) nedošlo na svorce jističe (MP 02 a MP 10) k překročení mezního limitu 70 K , který je na něj z pohledu normy kladen.

Izolace vodiče, která je vyrobena z polyvinylchloridu (PVC), má teplotní rozsah užití od -40°C do $+80^\circ\text{C}$, avšak norma určená pro přístroje klade požadavek u svorek vyrobených z mědi a galvanicky postříbřených na hodnotu oteplení max. 70 K . To je poněkud problematické - pokud by byl přístroj použit v teplotě okolí 40°C , objeví se na svorce teplota až 110°C , což je o $37,5\%$ více než dovoluje norma pro elektrické vodiče s PVC izolací.

Při ustálené hodnotě oteplení byla na pohyblivém kontaktu u strany vývodu teplota kolem 84 K. Pokud by byl přístroj provozován v doporučené teplotě okolí, objevila by se zde hodnota kolem 124 °C. Při této teplotě ještě naštěstí nedochází k znehodnocování elektrotechnického materiálu, který byl použit na kontaktní ramínko.

Předchozí informace však neplatí pro $1,18 \times I_n$. Zde se totiž objevila teplota přes 120 K, a to je při teplotě okolí 40 °C přes 160 °C. Při delším působení této teploty totiž může docházet k trvalým změnám materiálu, a to by mohlo mít nepříznivé účinky na jeho funkci a následně i bezpečnost. Seřízení spouště u těchto přístrojů je na tak vysoké úrovni, že po zvýšení z nevypínacího smluveného proudu, podle normy, na vypínací, dochází k vybavení jističe již po několika minutách.

Zajímavostí zůstává teplota na bimetalovém pásku. Ta je totiž při provozních stavech $0,7 - 0,8 \times I_n$, tak nízká, že je při kalibraci tepelné spouště zapotřebí vysoké přesnosti. Při provedení zkoušky *smluvený vypínací a nevypínací proud*, se vypočítá nevypínací hodnota proudu: $0,7 \times 250 \times 1,05 = 184$ A a *smluvený vypínací proud* je pouhých 230 A. To odpovídá teplotě na patě bimetalu kolem 70 K, a tedy použití velmi přesných komponentů na vybavovací části tepelné spouště.

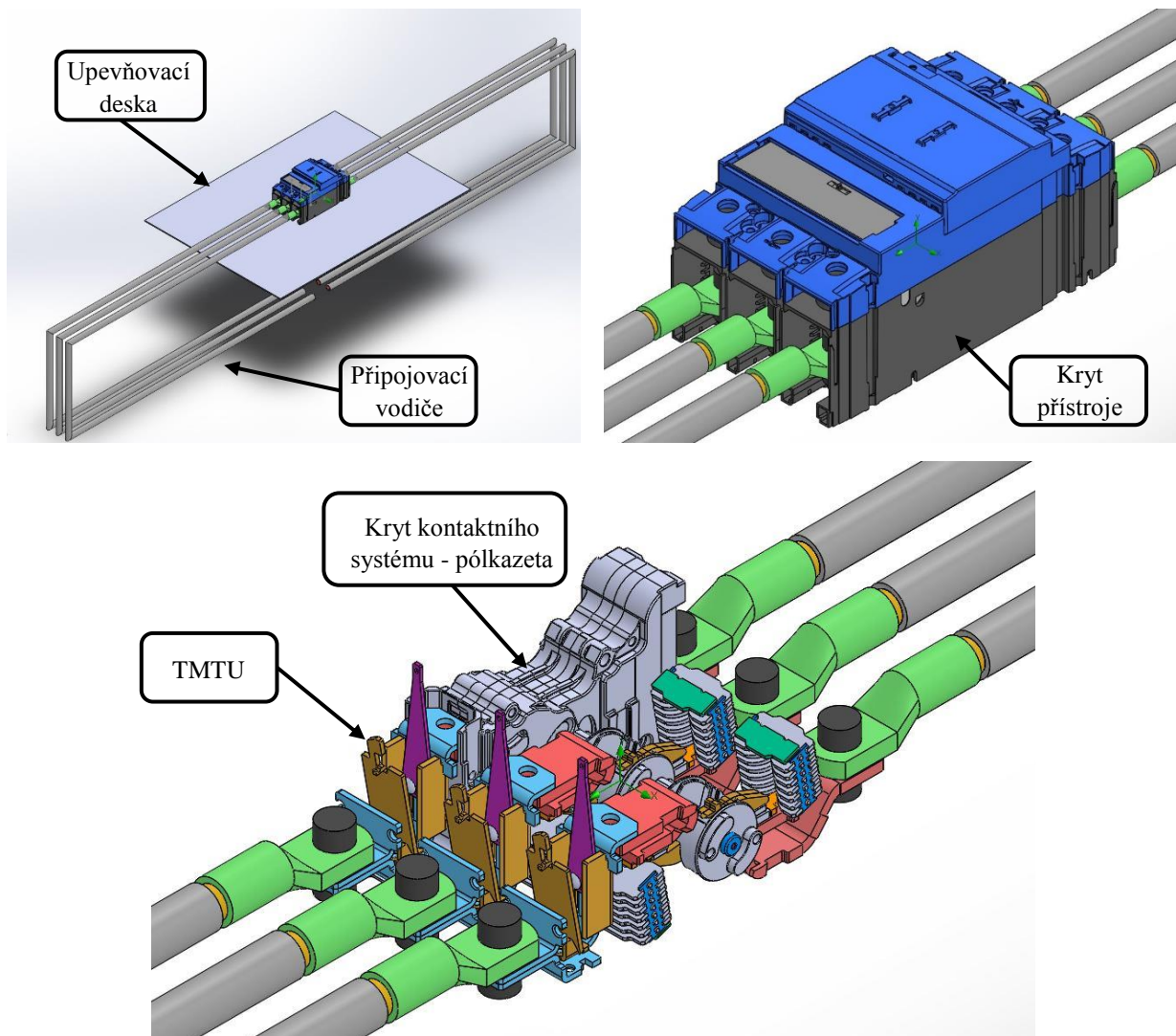
Záznamy laboratorního měření oteplení pro různé provozní stavy přístroje jsou uvedeny v příloze na str. 89.

6 TŘÍPÓLOVÝ NUMERICKÝ MODEL VÝKONOVÉHO JISTIČE

Nejčastější zapojení výkonového jističe je tři fázové. V České republice je v přenosové soustavě o kmitočtu 50 Hz fázový posuv mezi jednotlivými fázemi 120° elektrických. U moderního spínacího přístroje je vlastní spínací prvek každé fáze uložen v samostatné kazetě a proudová dráha je následně propojena s tepelnou a magnetickou spouští přístroje. Tento celek je pak uložen do plastové základny, osazen ovládacím mechanismem a spolu s vrchním krytem následně přišroubován k montážní desce.

Pro vytvoření odpovídajícího numerického modelu je zapotřebí použít veškeré důležité části jističe. Mezi ně se řadí:

- připojovací vodiče,
- upevňovací deska – rozměr je vždy udán výrobcem,
- originální proudová dráha jističe s topítkem,
- kryt kontaktního systému - pólkazeta,
- kryt přístroje.



Obrázek 35: Upravený model 3f jističe pro simulaci.

Připojovací vodič musí odpovídat požadavkům všeobecné normy. Pro jistič se jmenovitou hodnotou proudu 250 A musí mít délku minimálně 2 m a průřez jádra 120 mm² vyrobeného z elektrotechnické mědi. V tomto případě je použit jemně laněný vodič opatřen izolací z polyvinylchloridu s označením H07V-K, který je zakončen kabelovým okem (stejný vodič se používá pro oteplovací zkoušky). Norma povoluje použít i jiné způsoby připojení, ty ale musí definovat výrobce v příložené specifikaci (pasovina, hrubě i jemně laněný či plný vodič vyrobený z Cu nebo Al).

Upevňovací deska neboli základna - je vždy udán rozměr i materiál přímo od výrobce. Pouze jisticí přístroj, který je namontován na tuto základnu, splní veškeré požadavky normy, které jsou na něj kladeny (oteplení, vypínací charakteristiky při přetížení atd.).

Originální proudová dráha jističe, která je použita při výrobě, musí odpovídat i proudové dráze numerického modelu. Drobná modifikace je samozřejmě nutností, neboť problematika tolerancí, která u konstruktérů převládá, nedovolí tvorbu výpočetní sítě z důvodů kolize těles. Ulehčení výpočetní sítě se provádí potlačením mnoha nadbytečných úprav, které model obsahuje např. nadměrné množství zaoblených hran, vazby ploch pod úhlem 0,5° atd.

Kryt kontaktního systému - neboli pólkazeta zde hraje významnou roli. Nepoužitím tohoto krytu na numerickém modelu je narušena základní koncepce přístroje, a při jeho odstranění dojde k podstatnému ovlivnění proudění uvnitř přístroje. Tato část je proto použita bez dodatečných úprav geometrie.

Kryt přístroje je geometricky nejsložitější díl přístroje a skládá se ze dvou částí. Pro snadnou výrobu a dodatečné složení všech vnitřních prvků přístroje je vyroben z termoplastu a obsahuje mnoho úkosů i zaoblení. Odstranění těchto drobných úprav velmi odlehčí výpočtu a zároveň významně neovlivní proudění uvnitř přístroje.

6.1 Tvorba modelu a simulace ustáleného stavu

Jak je popsáno v předešlých kapitolách, po úpravě geometrie je zapotřebí aplikovat veškeré okrajové podmínky včetně přechodových odporů na oddělitelné části.

Postup v programu SolidWorks je následující:

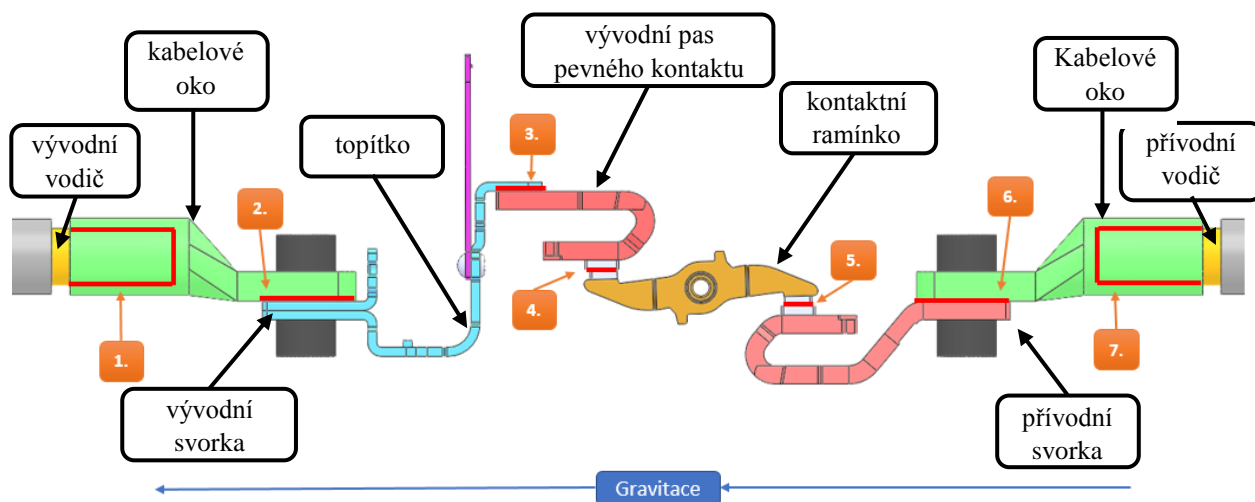
- Definovat oblast výpočtu
- Zvolit použité materiály a nastavit následující parametry:
 - Hustota
 - Specifické teplo
 - Tepelná vodivost
 - Elektrická vodivost / odpor
 - Bod tání
 - Drsnost povrchu
 - Emisivita
- Aplikovat přechodový odpor:
 - Tepelný
 - Elektrický
- Nastavit tok elektrického proudu
- Vybrat měřicí body
- Nastavit meteorologické podmínky:

- Teplota prostředí
- Teplota prvků
- Tlak
- Vlhkost, atd.

Poloha aplikace tepelného a elektrického odporu:

1. kabelové oko a jádro vývodního vodiče,
2. kabelové oko a vývodová svorka,
3. vývodový pas pevného kontaktu a topítko,
4. kontaktní styk na straně vývodu,
5. kontaktní styk na straně přívodu,
6. kabelové oko a přívodní svorka,
7. kabelové oko a jádro přívodního vodiče.

Na následujícím obrázku lze vidět tyto plochy vizuálně, jsou vyznačeny červenou barvou a očíslovány 1 – 7:

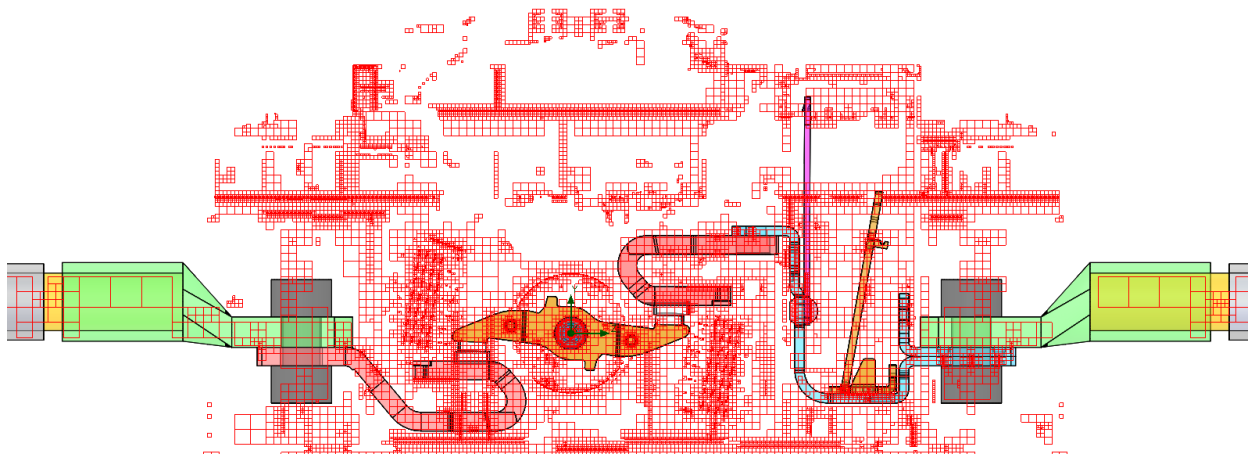


Obrázek 36: Popis oblastí pro aplikaci přechodového odporu (elektrický i tepelný).

Výpočetní síť modelu je možné vytvořit až po zadání výše popsanych podmínek. Doplněk Flow Simulation pracuje pouze s pravidelným šestistěnem, a proto je kladen veliký důraz na kvalitu sítě. Samotný program není omezen počtem buněk. Omezením je výpočetní server a jeho operační paměť. Celkový počet buněk musí vždy odpovídat složitosti modelu.

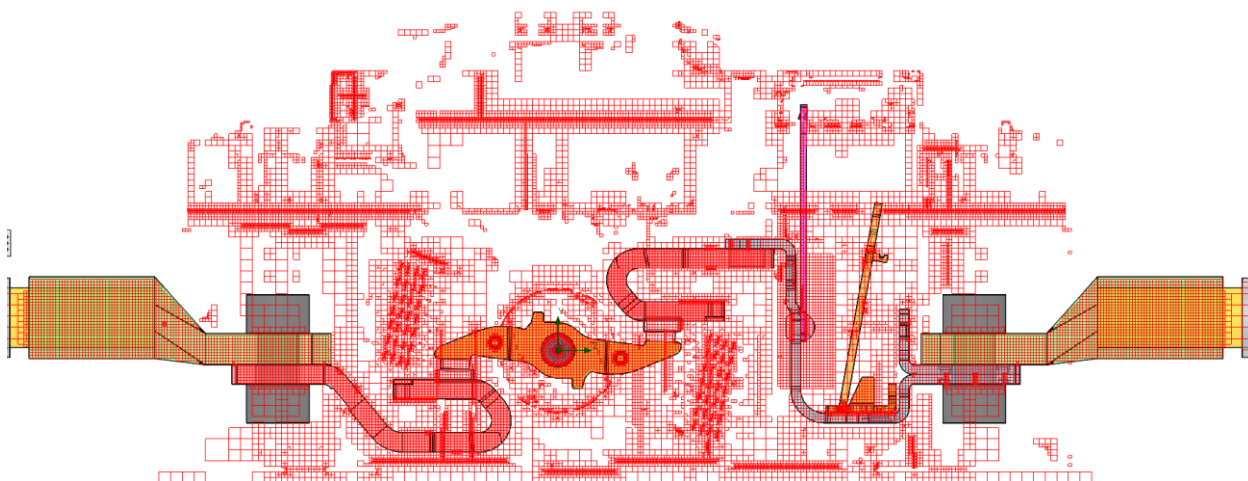
Výpočetní síť je možné nechat vytvořit manuálně, automaticky, anebo automaticky s možností adaptace sítě při vlastním numerickém výpočtu. Nevýhodou použití adaptace je, že lze výsledný model zacyklit, neboť při velice jemné výpočetní síti u komplikovaných modelů, nemusí dojít ke splnění podmínky posledního iteračního kroku – velká odchylka u sledovaných veličin.

Při zvolení hrubé sítě pro model jističe je na dalším obrázku (zobrazena pouze síť pevných látek) při nastavení jemnosti 4/8 vidět nežádoucí nelogické rozdělení sítě. Hlavním zdrojem tepla bude v tomto případě kontaktní rameno s kontakty a topítko, kde bude největší gradient teploty, což obecně vyžaduje zvolení jemnější sítě.



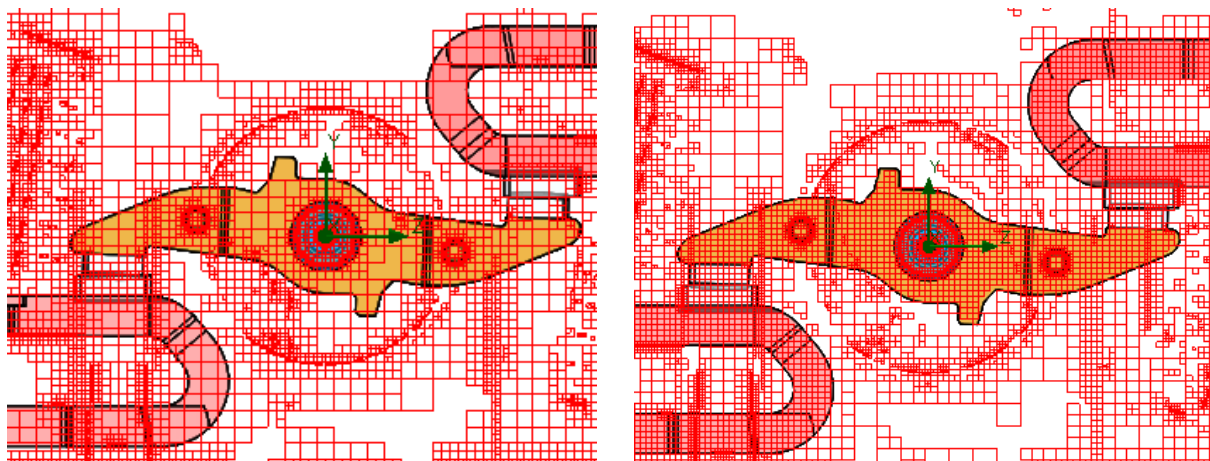
Obrázek 37: Nevyhovující rozložení sítě buněk při jemnosti kroku 4/8.

Tato síť obsahuje 174 tis. kapalných (fluid) buněk, 218 tis. buněk pevných (solid) a 420 tis. částečných (partial - kombinace obou výše zmíněných). Proto je zapotřebí zvolit minimálně tvorbu sítě s adaptací anebo přímo zadat vlastní podmínky na jemnost. Po dosazení jednotlivých proměnných jako jsou minimální vzdálenosti pro vzduchovou mezeru mezi buňkami, maximální velikost buněk, podmínky vzniku částečné buňky atd. byla vytvořena vyhovující síť. Viditelné rozdíly jsou například na kabelovém oku:



Obrázek 38: Vhodnější rozložení sítě buněk numerického modelu.

Na první pohled je znatelné, že jemnost sítě je změněna pouze pro vlastní proudovou dráhu jističe a nikoliv na všechny části. Toto opatření je provedeno pro omezení velikosti sítě a počtu buněk. I tak tento model 3f jističe obsahuje 0,745 mil. kapalných buněk, 15 mil. pevných buněk a 0,3 mil kombinací obou – u těchto buněk se speciálně dopočítává další korekce. Na následujícím obrázku je možné vidět detailní rozdíl na kontaktním ramínku, kontaktech a nosičích pevných kontaktů:



Obrázek 39: Porovnání tvorby sítě před (vlevo) a po (vpravo) manuálním nastavení podmínek.

Jemnost sítě po manuálním nastavení podmínek je pro tyto výpočty dostatečná a pouze při zachování stejného rozložení této sítě se neprojeví chyba daná její změnou. Výpočetní síť modelu je pro jakoukoliv hodnotu proudu při ustáleném výpočtu i přetížení totožná.

Před samotným výpočtem je velice důležité provést revizi modelu. Pod tímto pojmem se skrývají tři základní otázky, na které navazují další:

- Je fyzikální model vhodný?
 - Vzniká na modelu turbulentní proudění?
 - Je toto proudění nestacionární?
 - Je nutné počítat s vlivem stlačitelnosti?

Při přípravě modelu došlo k vynechání nedůležitých prvků, které mají zanedbatelný vliv na přesnost výpočtu. Proudění, které na modelu vzniká, je pouze přirozené, proto nehrozí vznik nežádoucích turbulencí. Proudění je stacionární a v daném bodě se s časem nemění. Vliv stlačitelnosti u přirozeného proudění lze zcela zanedbat.

- Jsou nastavené správné okrajové podmínky?
 - Je výpočetní oblast dostatečně velká?
 - Jsou okrajové podmínky přiměřené?

Je zapotřebí nastavit všechny parametry uvedené na začátku této podkapitoly, neboť pouze se všemi teplotně závislými materiálovými vlastnostmi lze korektně namodelovat skutečný stav, který při oteplovací zkoušce přístroje nastává. Nejdůležitějším úkolem je však korektně nastavit elektrický a tepelný odpor na silové kontakty kontaktního mechanismu. Zde totiž vznikají hlavní tepelné ztráty a tyto ztráty mají velký vliv na oteplení svorek jističe.

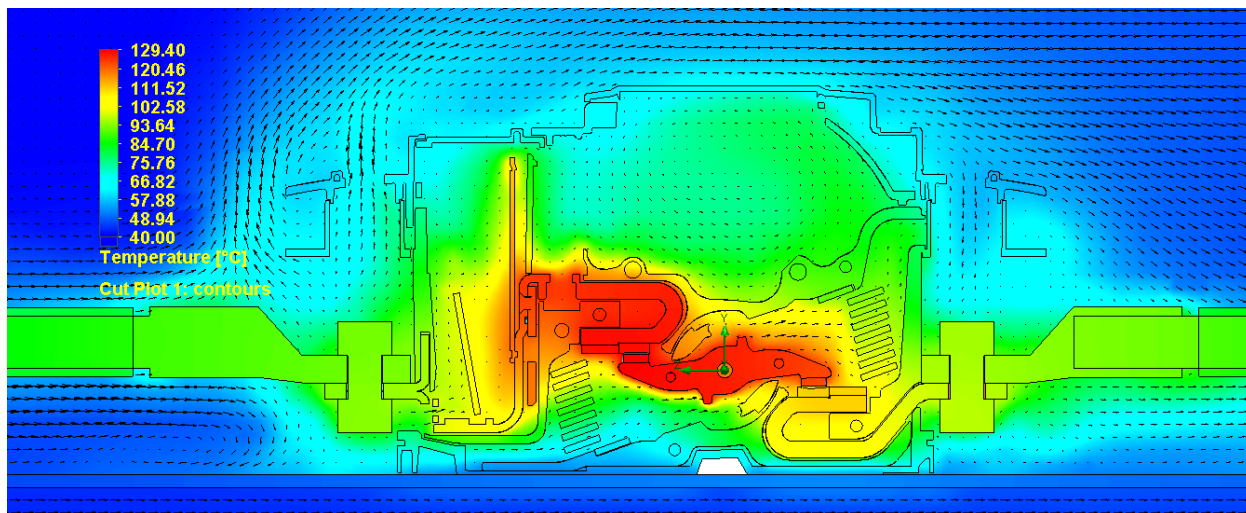
- Je vytvořena odpovídající síť?
 - Lze adaptací sítě zlepšit výsledky?
 - Dochází ke změně charakteru proudění v závislosti na adaptaci sítě?
 - Nepotřebují okrajové podmínky lepší síť?

Po první tvorbě sítě je zapotřebí provést analýzu kritických částí přístroje a podle toho síť upravit. Adaptací sítě je pravděpodobně možné docílit ještě přesnější výpočet. Bohužel zde hrozí zacyklování a nedostatek dostupné operační paměti počítače. Jelikož se jedná pouze o přirozené proudění, není zde očekáván stav s turbulencí a není nutné výpočetní síť měnit.

Pokud je model ve všech výše uvedených otázkách vyhovující, lze pokračovat v samotném výpočtu. Počítač s procesorem $4 \times 4,5$ GHz a RAM 32 GB vypočítá takto připravený model za cca 10 hodin (zatížení procesoru při výpočtu je kolem 90% a využití operační paměti je přes 15 GB).

6.1.1 Numerický výpočet ustáleného stavu

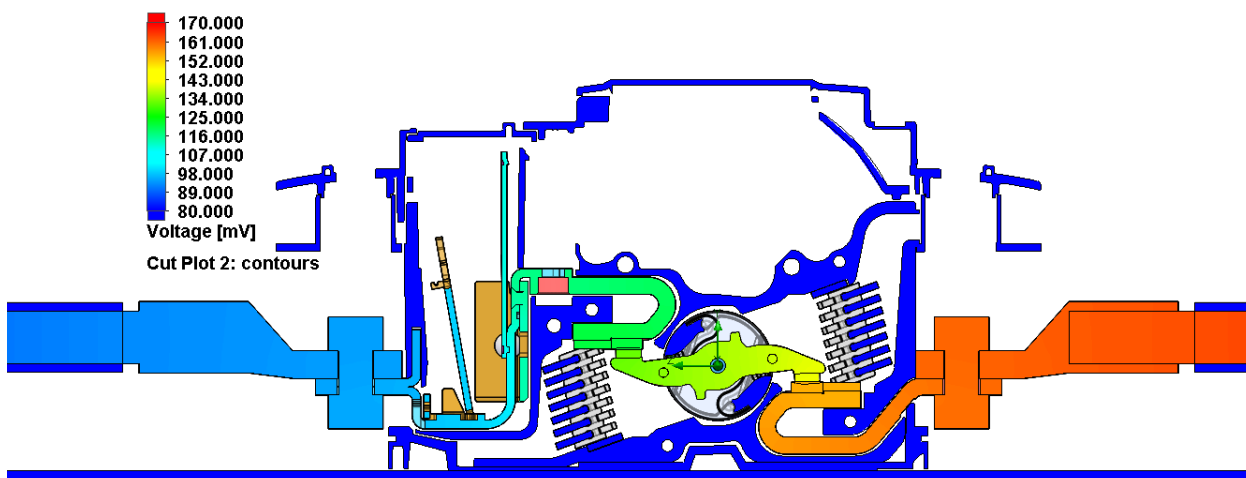
Jeden z nejhodnotnějších výstupů numerického modelu je rozložení teplotního pole. Na následujícím obrázku je numerický výpočet ustáleného stavu 3f jističe při jmenovitém zatížení 250 A a teplotě okolí 40°C :



Obrázek 40: Ustálený stav modelu 250 A, řez L2 – teplota $[\text{°C}]$.

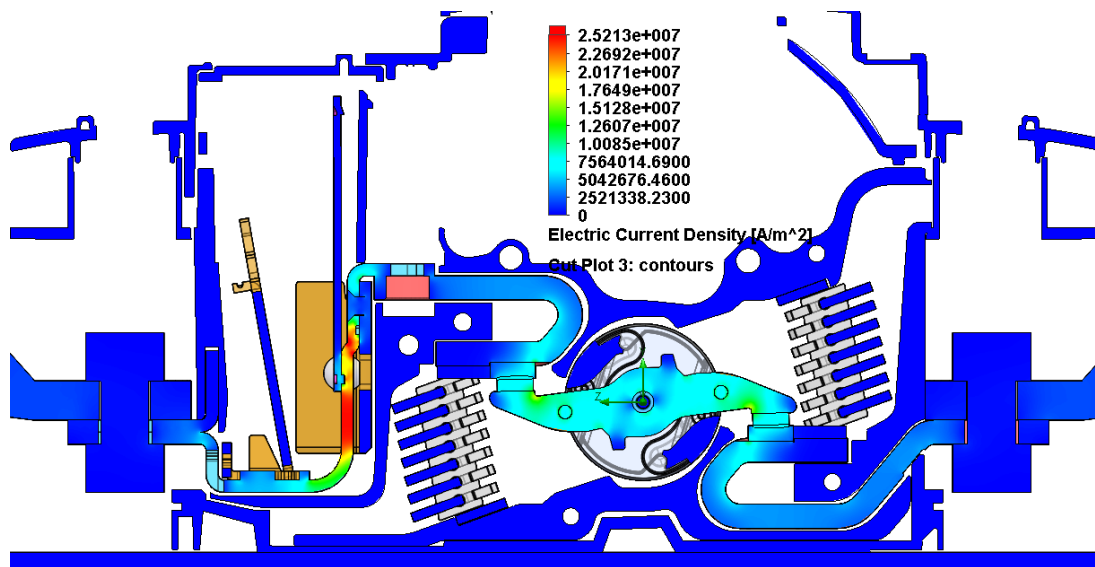
Prvním bodem analýzy numerického výpočtu jsou vektory proudění. Ty působí proti směru zemské gravitace (vztlak). Ze směru šipek je vidět, že je správně do vstupních podmínek výpočtu zadána hodnota gravitačního zrychlení na povrchu Země včetně směru.

Dle předpokladu je nejteplejší částí modelu kontaktní ramínko. To je z obou stran nahříváno z tepelných ztrát, které vznikají na kontaktním styku jističe. Teplotní gradient, který zde směřuje od připojovacích svorek jističe, vykazuje též obvyklé hodnoty. Z tohoto pohledu je výpočet validní, i když je zapotřebí překontrolovat i ostatní výstupy, jako například úbytek napětí na proudovodné dráze přístroje, kterou lze vidět na dalším obrázku.



Obrázek 41: Ustálený stav modelu 250 A, řez L2 – úbytek napětí $[\text{mV}]$.

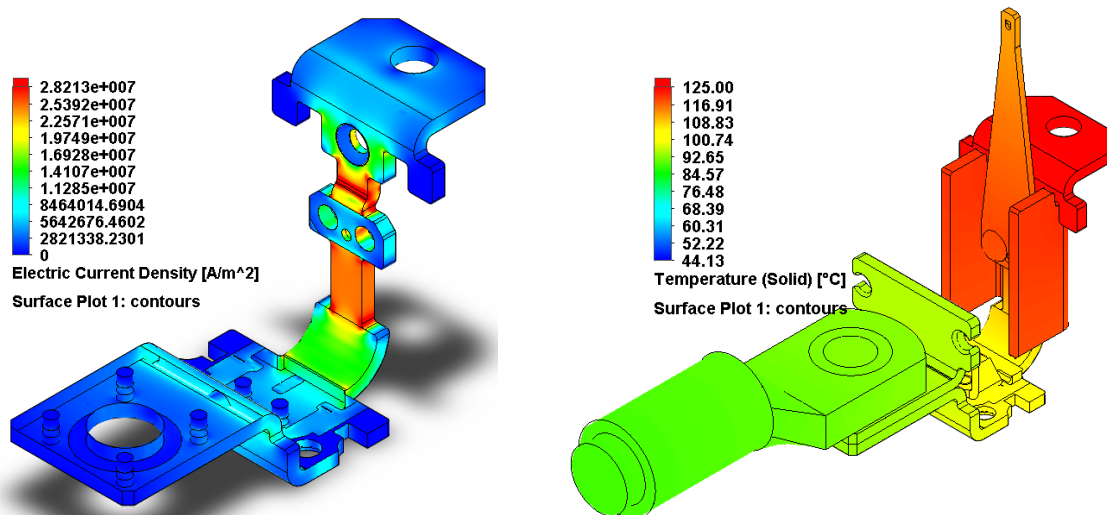
Úbytek napětí na proudové dráze se počítá od počátku vstupu elektrického proudu na připojovací vodič. Z tohoto důvodu je na svorce přístroje se vstupem proudu nenulová hodnota. Nárůst úbytku je pozvolný a nevykazuje žádné abnormality, proto je možné zkontrolovat i další výstup - rozložení hustoty elektrického proudu neboli proudové hustoty.



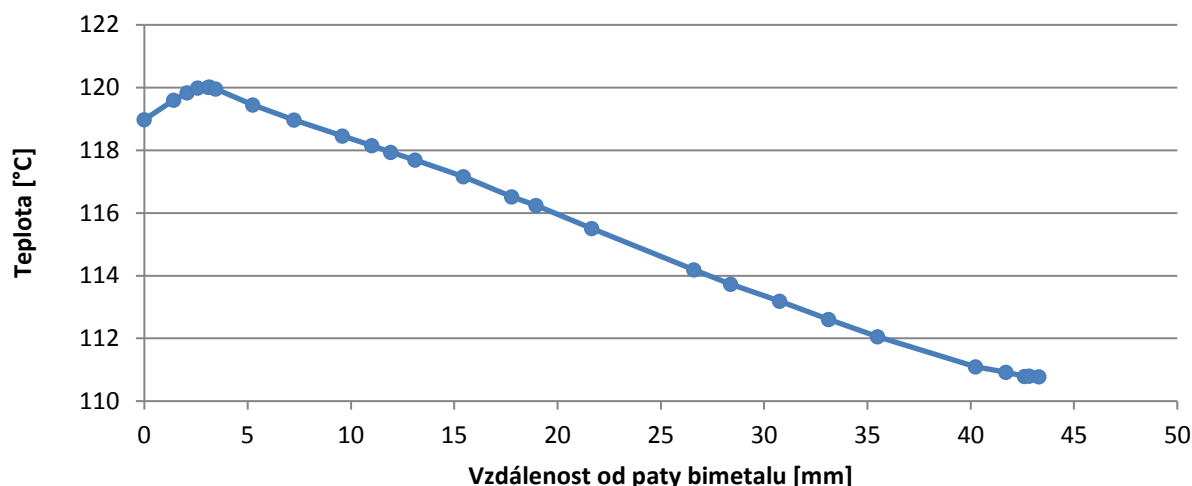
Obrázek 42: Ustálený stav modelu 250 A, řez L2 – rozložení hustoty proudu [A/m^2].

Původní předpoklad, nalezení kritické oblasti rozložení hustoty proudu na kontaktní páce přístroje potvrzen není. Hustota proudu v blízkosti pohyblivého kontaktu dosahuje kolem $12 \text{ A}/\text{mm}^2$ a dále se snižuje na $7,5 \text{ A}/\text{mm}^2$.

Při podrobné analýze proudové dráhy je nalezena zvýšená hustota proudu na topítku tepelné spouště přístroje, která ohřívá bimetal, a proto určité tepelné ztráty jsou zde žádoucí. Při výskytu malého přetížení tak bimetal dokáže v krátkém časovém intervalu reagovat a mechanicky vybavit západku střadače. Podle Obrázek 42 hustota proudu dosahuje hodnoty kolem $25 \text{ A}/\text{mm}^2$ - je tedy zapotřebí této oblasti věnovat zvýšenou pozornost.



Obrázek 43: Ustálený stav modelu 250 A, detailní studie topítka (Rozložení proudové hustoty - vlevo a Teplotní profil - vpravo).



Obrázek 44: Ustálený stav modelu 250 A, teplotní profil bimetalu prostředního pólu.

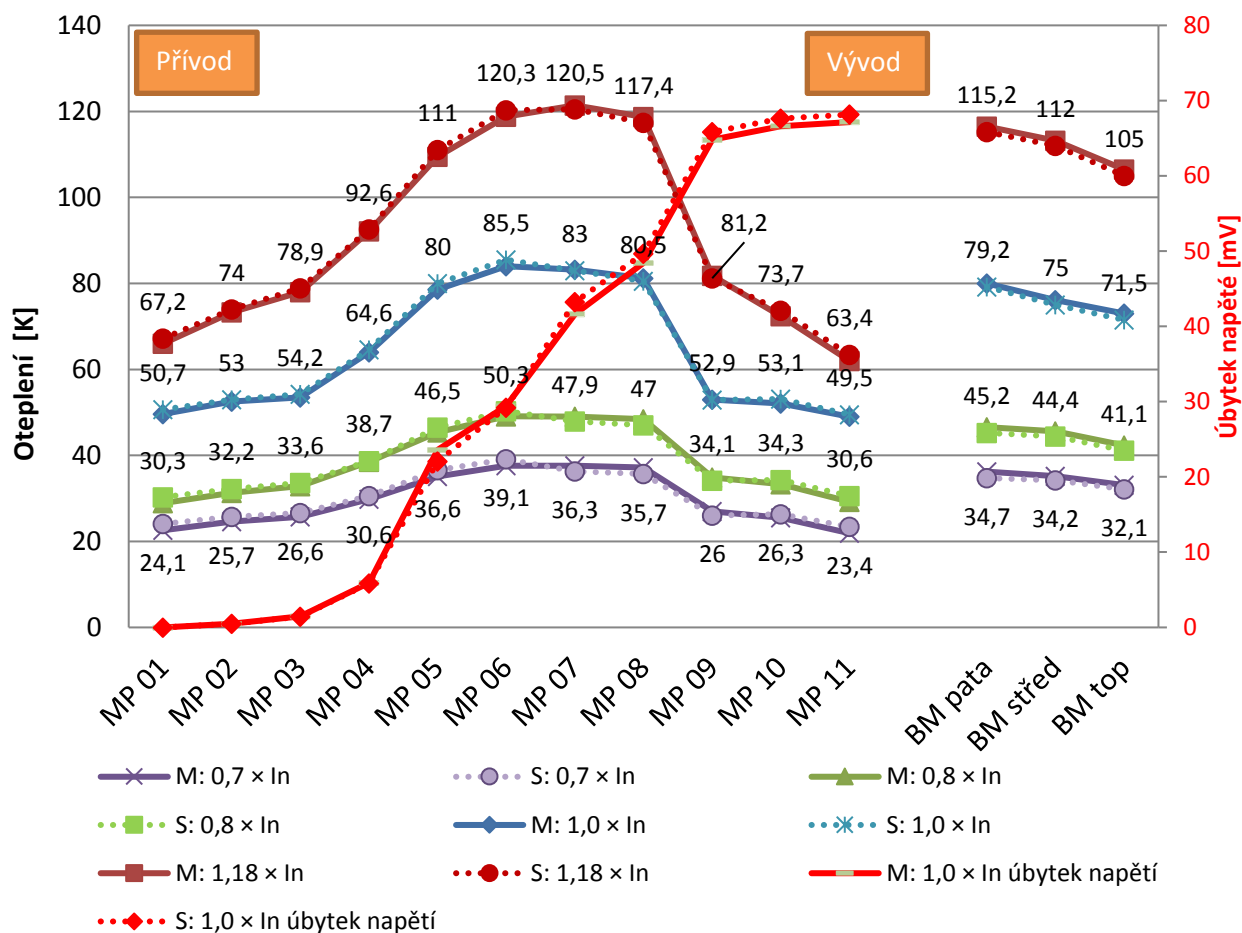
Detailní studie rozložení teplotního pole topítka s bimetalovým proužkem je na Obrázek 43 vpravo. Pro podrobnější analýzu je na Obrázek 44 doplněn graf teplotního spádu bimetalového proužku. Na patě bimetalu (0 – 5 mm) se objevuje požadované oteplení kolem 80 K, a proto lze oteplení topítka definovat jako standardní stav.

Podrobně znázorněná proudová hustota topítka je na Obrázek 43 vlevo. Zúžení, které je z obou stran od části sloužící k přinýtování bimetalového pásku, zde vytváří zvýšenou hustotu proudu. Za standardního provozu (jmenovitá hodnota proudu) je tato část dostatečně ochlazována, a nehrozí tak žádné poškození. Problém může nastat při přetížení přístroje, kdy daná oblast nebude dostatečně ochlazována (zejména vedením) a hrozí poškození, tedy přepálení dané oblasti. Tato problematika je dále rozepsána v kapitole 6.2: *Simulace přetížení*.

Ostatní obrázky numerického výpočtu v ustáleném stavu jsou pro různé hodnoty zatížení přístroje uvedeny v příloze na str. 91–94.

6.1.2 Porovnání numerického modelu v ustáleném stavu s laboratorním měřením

Nejjednodušším způsobem verifikace modelu je jeho porovnání s naměřenými hodnotami z laboratorního měření, viz následující graf. Laboratorní měření probíhalo při pokojové teplotě a numerický model byl počítán při referenční teplotě přístroje, proto jsou porovnány přímo hodnoty oteplení této proudové dráhy a tento graf také popisuje úbytek napětí na jednotlivých měřicích bodech. Graf je pro přehlednost vykreslen pouze pro prostřední pól. Standardně tento pól bývá nejvíce teplotně namáhán a při stejných hodnotách úbytku napětí se nejkritičtější části jističe přehřívají o cca 10 K vzhledem ke krajním fázím.



Obrázek 45: Graf naměřených a vypočítaných hodnot oteplení na prostředním pólu jističe při různých stavech zatížení.

Podle hodnot jednotlivých měřicích bodů lze usoudit, že kvalita modelu je na vysoké úrovni, neboť jedinou změnou na modelu, která je mezi výpočty provedena, je změna hodnoty proudu z Tabulka 10: Požadované hodnoty proudu pro měření ustáleného stavu.

Maximální odchylka výpočtu je na nejteplejším místě simulace 1,5 K pro pozici MP 06 při hodnotě proudu $1,18 \times I_n$. Tato odchylka vykazuje relativní chybu 1,8 %. Oproti tomu nejhorší relativní chyba modelu je na nejchladnějším místě modelu, a to je MP 01 při simulaci provozního stavu přístroje $0,7 \times I_n$. Zde vychází relativní chyba 6,9 %. Tato odchylka se může jevit jako zcela nevyhovující, ale ve skutečnosti se jedná o absolutní chybu pouze 1,5 K. Tato hodnota totiž byla na začátku výpočtu nastavena jako maximální.

Výpočet teploty u jisticích přístrojů není tak jednoduchý jako například u točivých strojů, kde převažují kovové materiály, a navíc se často jedná o nucenou cirkulaci chladicího média – nejčastěji vzduchu. Kryt kompaktních jisticích přístrojů se totiž skládá ze speciálních samozhášecích materiálů s vysokým obsahem skla. Vlastnosti těchto materiálů mohou být velice citlivé na meteorologické podmínky a v kombinaci s mechanickým napětím vyvozeným spínacím systémem si mohou kontakty jinak dosednout, což se projeví jiným přechodovým odporem, se všemi důsledky. Z tohoto důvodu byla předurčena maximální absolutní chyba simulace na 1,5 K bez ohledu na vztažnou hodnotu absolutní chyby s tím spojenou. Hranice relativní chyby nebyla ani jednou u modelu překročena.

Na pravé straně grafu na Obrázku 45 je možné podrobně prostudovat hodnoty oteplení, které byly zjištěny na tepelné spoušti přístroje, přesněji na bimetalu. Tato hodnota je velice důležitá pro správnou kombinaci s nastavovací lištou střadače a jeho západky, kdy doporučená hodnota oteplení paty bimetalu je kolem 80 – 90 K. Tato hodnota byla předem určena pro použití již specifikovaného typu bimetalu, respektive trimetalu. Třetí kov implementovaný mezi pasivní a aktivní část bimetalu má totiž na starosti regulaci rychlosti ohýbání.

Do stejného grafu byl také zakreslen profil úbytku napětí pro režim přístroje $1,0 \times I_n$. Ten nám pomohl v nastavení přechodových odporů na kontaktním styku přístroje a dalších důležitých částí. Při laboratorním měření byla zjištěna hodnota 66 mV a model ji ve stejném profilu kopíruje. Maximální odchylka, která zde vznikla, je 1,6 mV na pozici MP 07, a to odpovídá relativní chybě 1 %.

Jak bylo popsáno v předchozích odstavcích, jisticí přístroj je velice citlivý na přechodový odpor mezi kontakty. Vlivem vypínání nadproudů totiž dochází ke vzniku elektrického oblouku, který nevratně poškozuje povrch kontaktů. Za určitých podmínek na tomto kontaktním styku probíhá při zapnutí přístroje tzv. samočištění kontaktu a ve spojení s dynamickou silou ovládací pružiny a následně zvýšenou teplotou ji lze mírně eliminovat. Z tohoto důvodu jsou provedeny další numerické výpočty, které odhalí vztah mezi hodnotou oteplení kontaktní páky, potažmo pohyblivými kontakty a svorkami jističe.

6.1.3 Vliv přechodového odporu silových kontaktů na oteplení přístroje

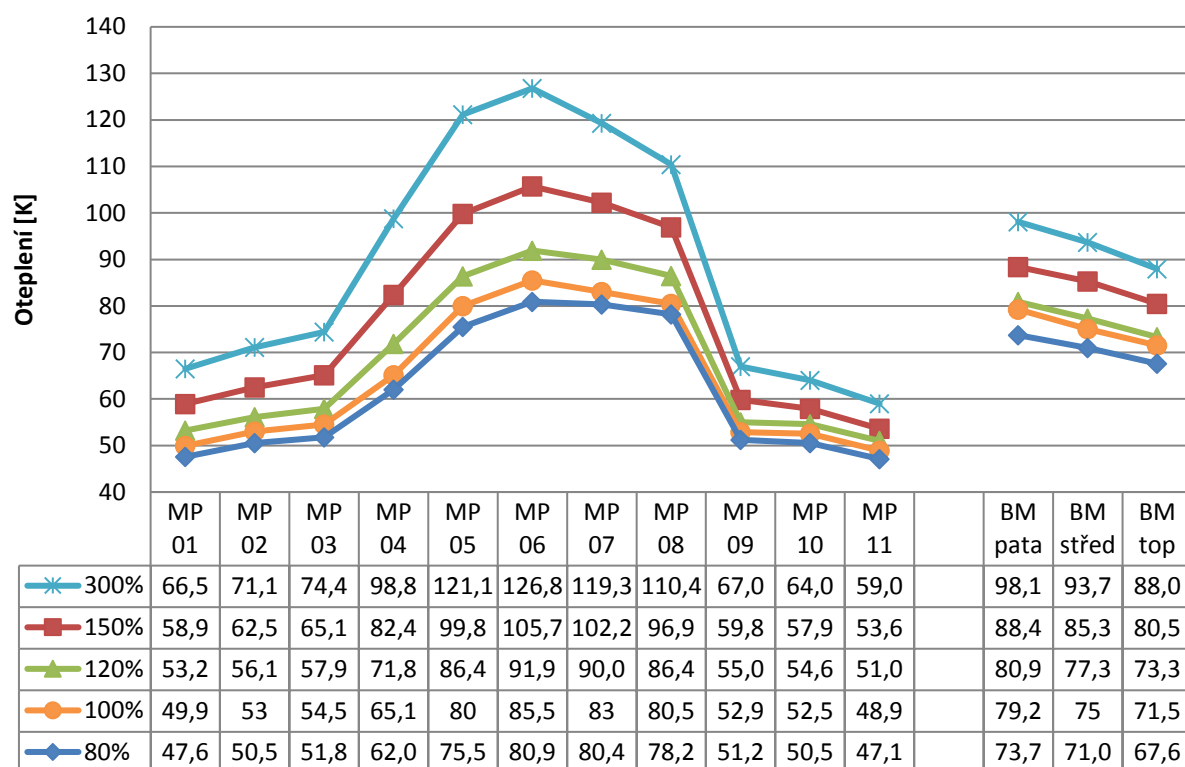
V předchozí kapitole byla diskutována verifikace numerického modelu jističe a důsledky přechodového elektrického odporu na silových kontaktech vlivem eroze a mechanického poškození od ovládacího mechanismu na oteplení přístroje.

Z tohoto důvodu je zapotřebí provést analýzu proudové dráhy při různých hodnotách přechodového odporu a následně odhalit, zda může docházet k poškození kontaktní páky. Kontaktní páka je totiž z obou stran zahřívána, a vedením tak nemůže být účinně ochlazována, tak jako je to u jedno-kontaktního spínacího přístroje.

Hodnoty elektrického odporu jsou na numerickém modelu nastaveny následovně:

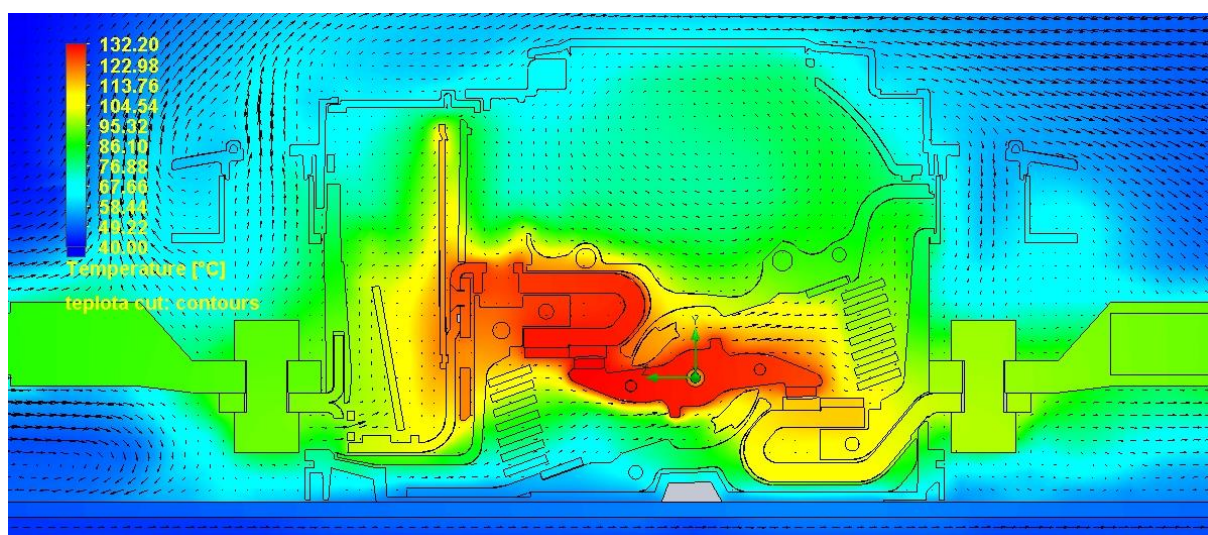
1. +200 % od normálního provozního stavu,
2. +50 % od normálního provozního stavu,
3. +20 % od normálního provozního stavu,
4. normální provozní stav,
5. -20 % od normálního provozního stavu.

Numerický model je vytvořen pro teplotu okolí 40 °C, při jmenovitém zatížení a je použit 3f model, kde elektrický proud protéká všemi fázemi. Teplotní profil proudovodné dráhy je na následujícím grafu:



Obrázek 46: Vliv přechodového odporu silových kontaktů na teplotní profil přístroje při 250 A.

Z výsledků numerického výpočtu je zřejmé, že pokud se zvýší hodnota elektrického odporu na silových kontaktech přístroje do 20 %, nejedná se o žádný abnormální jev a všechny hodnoty oteplení na proudové dráze vykazují vyhovující teplotní profil. Nutno podotknout, že vycházíme z laboratorního měření přístroje, který je v dobrém technickém stavu, a proto lze předpokládat, že většina jističů se pohybuje blíže k tomuto teplotnímu profilu. Rozložení teplotního pole pro tento model je vyobrazeno na dalším obrázku.



Obrázek 47: Ustálený stav modelu při přechodovém elektrickém odporu 120 %, 250 A, řez L2.

U teplotního profilu přístroje při nárůstu přechodového odporu o 50 % lze jednoznačně vyhodnotit, že přístroj těmto podmínkám vyhovuje a ani v tomto případě nedojde k překročení limitů, které jsou na ně kladeny normou z hlediska oteplení přístroje.

Samozřejmostí, je i to, že přechodový odpor se může snížit. Pokud k tomu dojde a toto snížení není větší než 20 %, nedojde k výraznému ovlivnění funkce tepelné spouště.

Dále je vidět, že podle numerického modelu vede rozdíl v oteplení na kabelovém oku vodiče o 12 K (MP 02) a na svorce o 13,3 K (MP 03) na přívodní straně přístroje k rozdílu 14,7 K na patě bimetalu.

Z analýzy numerických modelů vyplývá, že díky kvalitní konstrukci topítka nebude docházet k nežádoucímu vypnutí elektrického obvodu. Tento stav by mohl nastat tehdy, pokud by tepelná spoušť nebyla dostatečně odolná vůči cizím tepelným ztrátám, než jsou ty vlastní. Spoušť by totiž mohla nesprávně vyhodnocovat stav přetížení a bimetal by následně pomocí západky střadače uvolnit vypínací pružiny přístroje, i když by neměl.

V případě, že přechodový odpor silových kontaktů stoupne u nového přístroje o 200 %, přístroj už nesplní limit na oteplení svorky na přívodní straně. Teplota bimetalu však je v tomto případě pod reakční hodnotou, a přístroj tak nevybaví. Tato hodnota přechodového odporu je natolik vysoká, že se za standardních provozních podmínek na přístroji neobjeví.

Jediná možnost, kdy se tato hodnota mezi kontakty může objevit, je po vypnutí zkratového proudu. Zkušební sled II normy požaduje po přístroji provedení zkratové zkoušky (3×), a to v pořadí *O-t-CO-t-CO*, při intervalu $t = 3$ min. Po této zkoušce následuje *Proověření provozuschopnosti*, *Proověření elektrické pevnosti a svodových proudů* a právě jako předposlední test je zde požadováno *Proověření oteplení*. Nároky na oteplení jsou v tomto bodě podobné jako při oteplovací zkoušce na novém vzorku, avšak je zde zvýšena tolerance na oteplení svorek o +10 K. Limity na jiné části přístroje (např. kryty, ovládací páka) zde nejsou předepsány. Tuto hodnotu přístroj nepřesáhl, a proto lze vyhodnotit, že za těchto podmínek by přístroj vyhověl.

Ostatní obrázky numerického výpočtu pro různé hodnoty elektrického odporu na silových kontaktech při jmenovitém zatížení přístroje jsou v příloze na str. 96

6.1.4 Modifikace tepelné spouště přístroje a vliv na oteplení

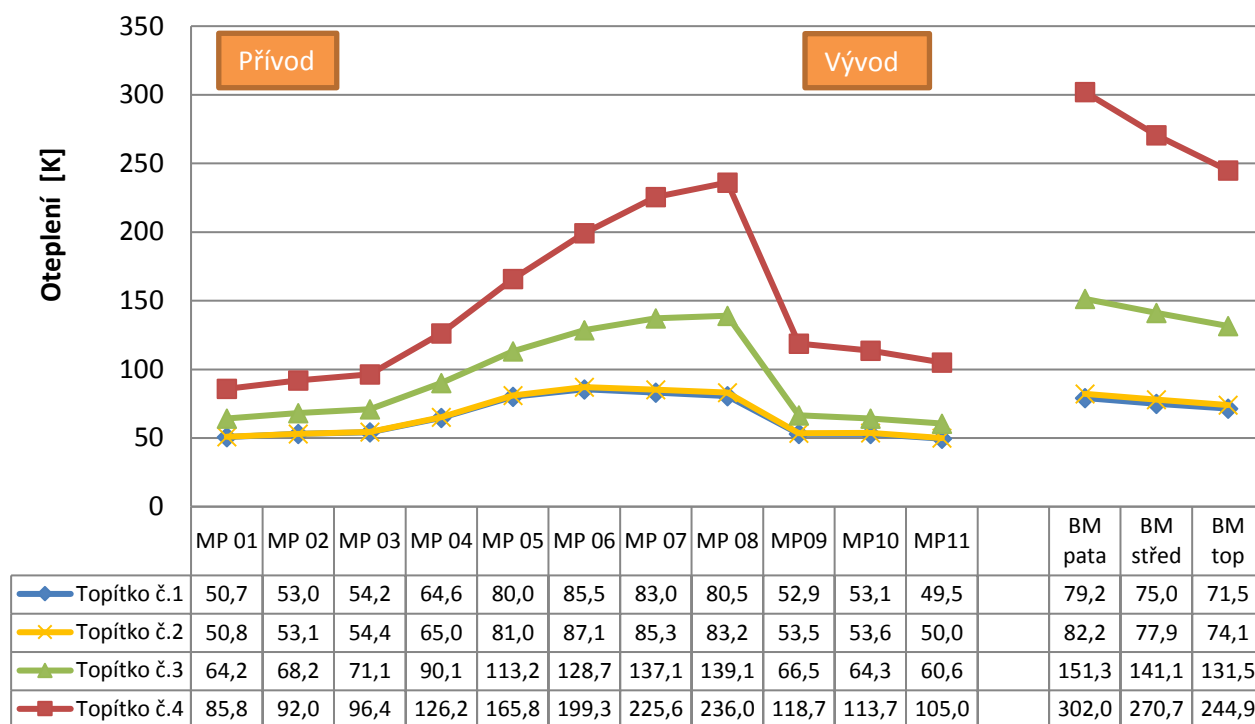
V kapitole 6.1.1: *Numerický výpočet ustáleného stavu* je uvedeno, že tepelné ztráty topítka jsou důležité pro správnou funkci tepelné spouště, respektive bimetalu. Tyto ztráty nesmí být malé – bimetal by nedokázal korektně reagovat na stav přetížení, a ani velké – bimetal by mohl vypínat nižší proudy než by byla vlastní jmenovitá hodnota přístroje. Obě možnosti jsou samozřejmě nepřijatelné.

Dalším analyzovaným bodem je proto vliv změny materiálu a rozměru topítka na vlastní kontaktní mechanismus přístroje. K tomu může teoreticky dojít při záměně topítek na výrobní lince.

Z těchto důvodů jsou pro modelování vybrány tyto 4 změny:

1. Originální materiál i rozměr topítka.
2. Originální materiál, ale průřez úžinové části topítka zmenšen o 20 %.
3. Změna materiálu – snížení elektrické vodivosti cca 2×, ale originální rozměr topítka.
4. Změna materiálu – snížení elektrické vodivosti cca 5×, ale originální rozměr topítka.

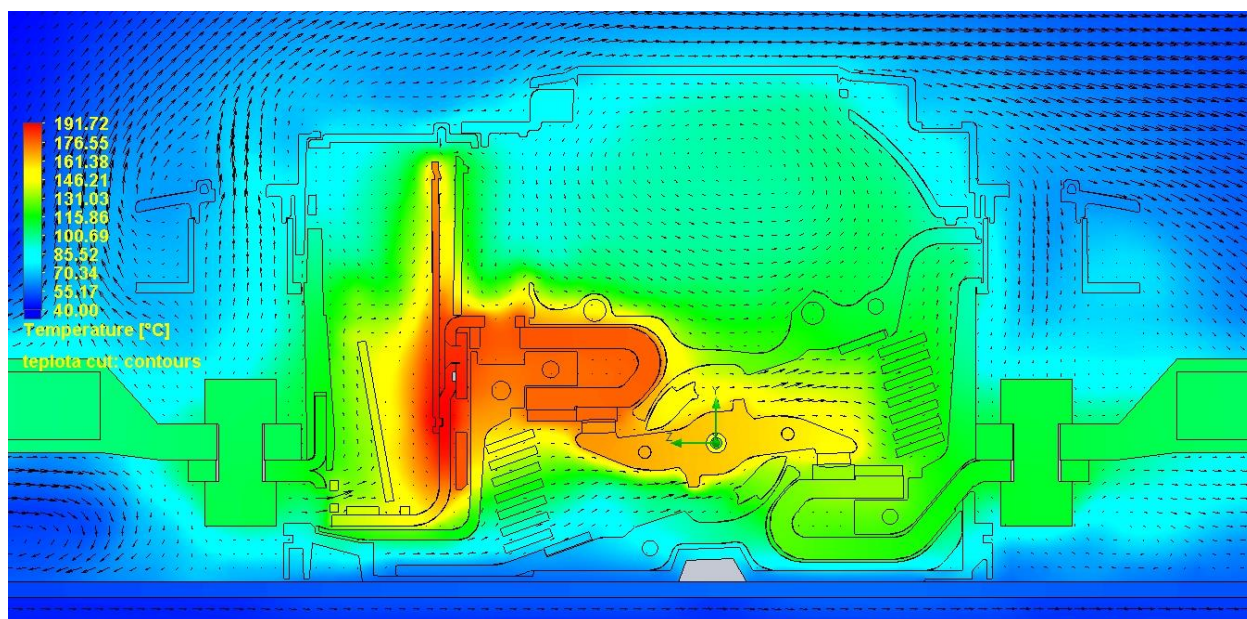
Numerický model je počítán při teplotě okolí 40 °C, při jmenovitém zatížení, kde elektrický proud protéká všemi fázemi.



Obrázek 48: Teplotní profil proudové dráhy přístroje pro různé verze topítka tepelné spouště.

Z vypočítaných hodnot je patrné, že Topítka č. 2, kde bylo provedeno odebrání materiálu v oblasti zúžení o 20 %, nemá velký výrazný na teplotní profil přístroje a ve vykresleném grafu se tato křivka prolíná s Topítkem č. 1. Jedinou znatelnou změnou je vyšší teplota na patě bimetalu a to o 3 K (resp. +3,8 %). Tato změna nemá vliv na vypínací charakteristiku spouště.

Pokud by byl použit materiál topítka s 2× větším elektrickým odporem, oteplení přístroje by požadavkům normy ještě vyhovělo (bod MP 02 a MP 10), avšak teplota na patě bimetalu je natolik zvýšená, že při jmenovité hodnotě proudu by docházelo k vypnutí přístroje. Podrobné rozložení teploty na proudové dráze je na následujícím obrázku:

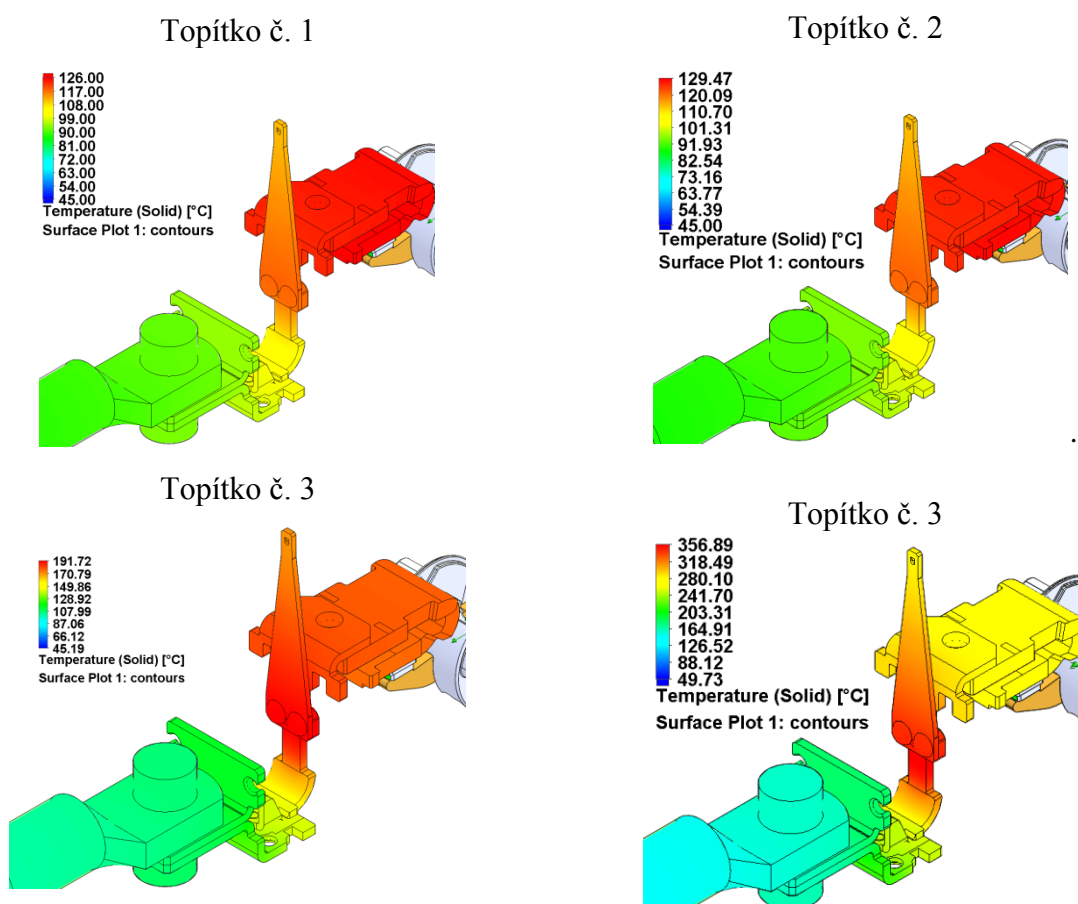


Obrázek 49: Ustálený stav modelu s topítkem č. 3, 250A, řez L2.

Model s nejvyšším oteplením, který se v porovnání vyskytuje, je s Topítkem č. 4. Materiál u tohoto modelu má cca 5× nižší vodivost než je originální varianta. Tato změna způsobí vyšší hodnotu ztrátového výkonu topítka, než je požadováno. Jelikož výkon lze spočítat jako součin odporu a druhé mocniny proudu, dají se předpokládat značné tepelné ztráty. Tento předpoklad numerický model potvrzuje a vlastní ztráta na topítku tepelné spouště je 15,5 W (+182 %). Tyto ztráty způsobují, že oteplení na patě bimetalu vzroste na 302 K. Vlivem takto vysokých hodnot oteplení topítka také nedochází k účinnému chlazení kontaktního styku kontaktního systému na straně zátěže. Maximální hodnota oteplení kontaktního ramínka s pohyblivými kontakty je 236 K, což by vedlo k nevratným změnám na materiálu proudovodné dráhy přístroje i jeho plastových částí.

Z výše vypsanych důvodů se modely proudovodné dráhy s topítkem č. 3 a 4 jeví jako nevyhovující – přístroj by vypínal i jmenovité hodnoty proudu.

Na nadcházejícím souboru obrázků lze jasně vidět, jak hodně jednotlivé změny ovlivní rozložení teplotního pole na proudové dráze topítka tepelné spouště jističe.



Obrázek 50: Rozložení teploty pro různé verze topítka.

Na výrobní lince je každá tepelná i zkratová spoušť jističe samostatně kalibrována. Při vlastní kalibraci tepelné spouště dochází k nastavení vzdálenosti mezi vybavovací tepelnou hřídelí a terčíkem bimetalu. Automatické kalibrační stanoviště má nastavené tak precizní podmínky, že by záměnu topítek ihned odhalil a označil by přístroje jako nevyhovující z důvodu neseřaditelnosti. Tyto přístroje by následně z výrobní linky vyřadil.

Ostatní obrázky s rozložením teplotního pole numerického výpočtu lze pro různé verze topítek nalézt v příloze na str. 95.

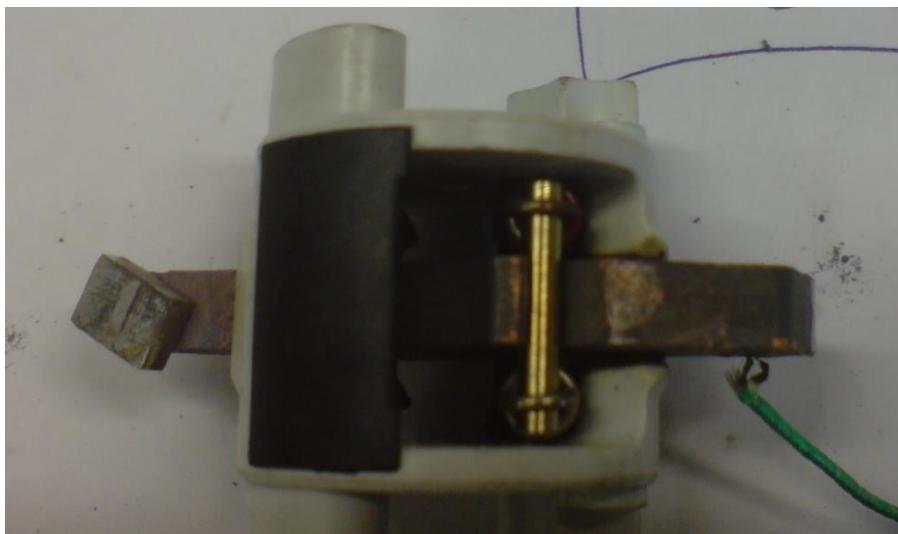
6.2 Simulace přetížení

Základní funkcí jisticího přístroje je automaticky vyhodnocovat velikost proudu. Pokud daný nadproud (přetížení či zkrat) trvá déle, dochází po určité době dané jeho vypínací charakteristikou k samočinnému rozpojení silových kontaktů. Oproti pojistce je hlavní výhodou jističe možnost používat ho opakovaně.

Instalace kontaktů na spínacích přístrojích je velice problematická a vyžaduje mnoho, zejména praktických zkušeností. Spojení těchto dvou částí přístroje musí být zpracované na velmi vysoké úrovni, neboť při přetížení přístroje se zde vyskytují teploty, které se pohybují v řádu stovek °C.

Existují dva nejčastější způsoby spojení kovových materiálů. Jedná se o pájení a svařování, avšak první z nich je v elektrotechnice zastoupen v mnohem větším měřítku, než ten druhý. Podle způsobu pájení používáme tavidla pro měkké pájení (do teploty 450 °C) a pro tvrdé pájení (nad teplotu 450 °C). Předpokládané teploty kontaktního ramínka vedou k nutnosti použít tvrdé pájení.

Nejkritičtější částí moderního jističe je jeho rotační systém. Jeho výhody se zde proměňují v nevýhody a kontaktní ramínko je z obou stran zahříváno od kontaktního styku a zde přítomného přechodového odporu. Pokud teplota na ramínku v blízkosti pohyblivého kontaktu přesáhne cca 600 °C dojde k jeho uvolnění, neboť tvrdé pájky, které se zde používají, mají pracovní teplotu kolem této hodnoty. Tuto skutečnost potvrzuje následující obrázek:



Obrázek 51: Upadnutý pohyblivý kontakt jističe po dosažení teploty > 600 °C.

Z tohoto důvodu se stanovila bezpečná mez teploty unášeče pohyblivých kontaktů (ramínko) na 500 °C. Numerický model by měl potvrdit, za jak dlouho tuto hodnotu spínací přístroj dosáhne a následně bude zapotřebí dosažené výsledky porovnat s vypínacím časem tepelné spouště.

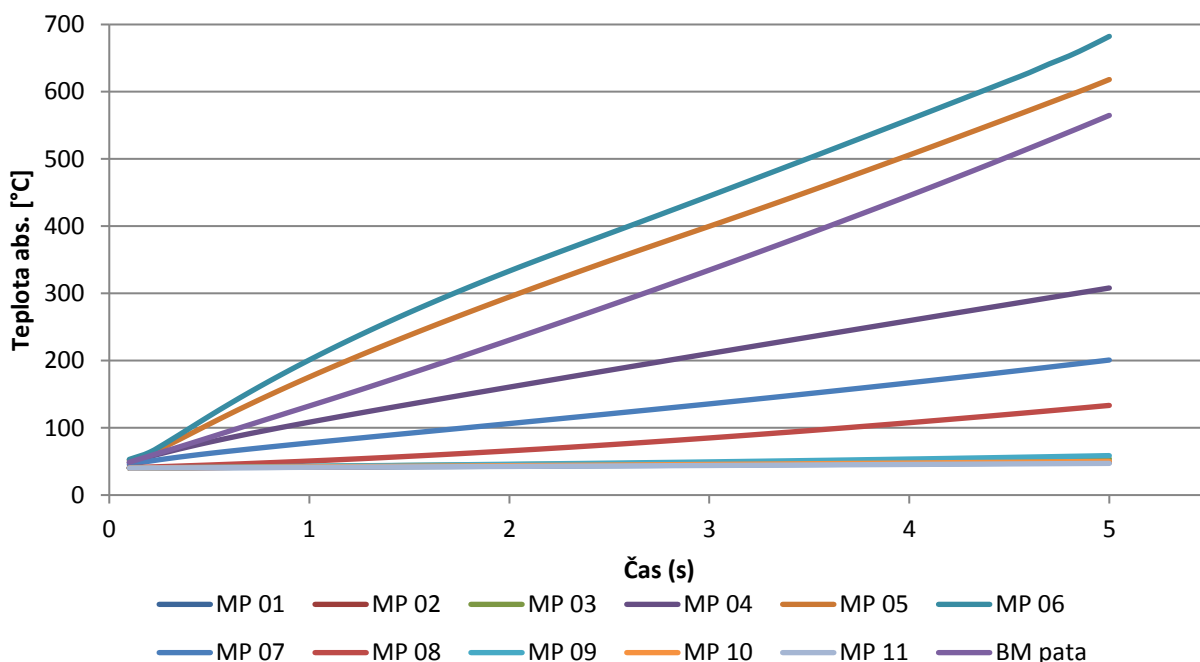
Zkratovou spoušť je možno dle zadání nastavit od $5 - 10 \times I_n$. Z důvodu objektivit výpočtu jsou hodnoty dále rozšířeny, a to od $4 - 12 \times I_n$ (tolerance zkratové spouště je 20 %). Pokud je zkratová spoušť nastavena na požadovaný násobek jmenovitého proudu, vypnutí do tohoto násobku musí zajistit tepelná spoušť přístroje.

Jelikož provozní stav přetížení většinou vzniká jednofázově, je použit 3f model přístroje, ale pro tok elektrického proudu je použit pouze prostřední pól.

Během reálné zkoušky spínacího přístroje při přetížení dochází vlivem tepelných ztrát na proudové dráze a v důsledku nezanadbatelného působení elektrodynamických sil ke změně skutečné kontaktní plochy, a tedy změně přechodového odporu na kontaktním styku.

Veškeré tyto vlivy musí být na model zjednodušeně aplikovány, což je provedeno pomocí proměnného odporu, který je na styčnou plochu kontaktu nastaven. Tento odpor je teplotně závislý a obsahuje jak tepelnou, tak i elektrickou složku.

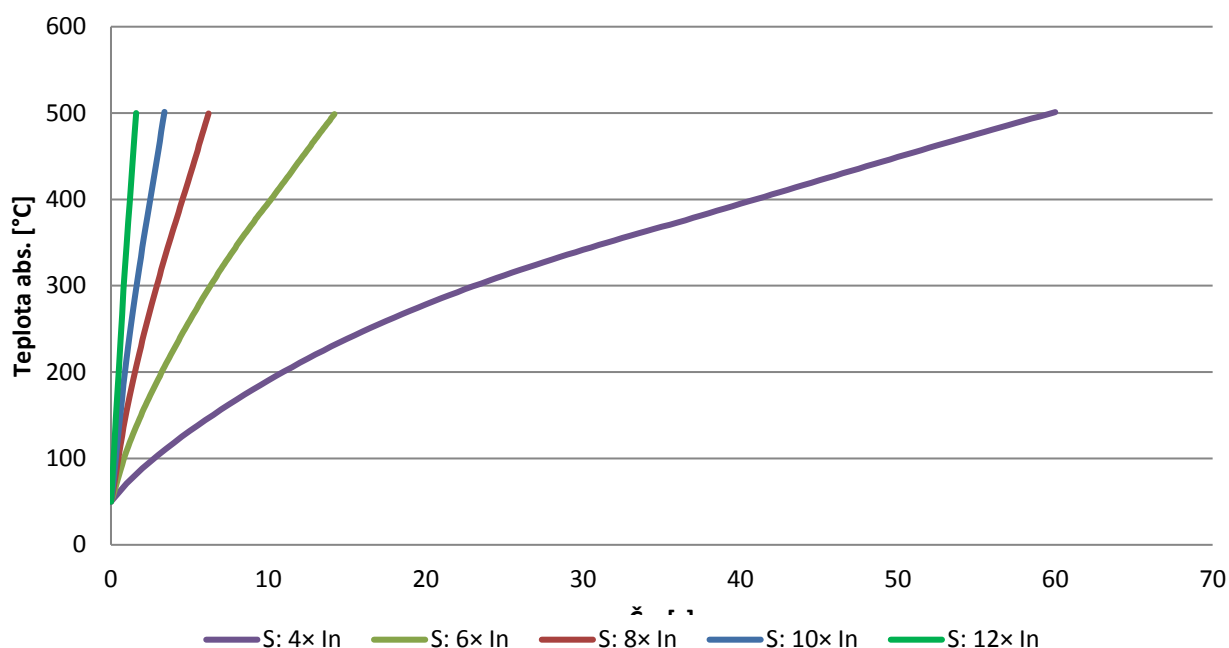
Z numerického výstupu je možné získat kompletní přehled všech měřených bodů MP 1 – 11, viz následující graf při $10 \times I_n$.



Obrázek 52: Numerický model přetížení při $10 \times I_n$

Za povšimnutí stojí hodnota absolutní teploty pro bod BM pata. Tento bod je na patě bimetalu, a i když se předpokládalo, že nejkritičtější částí z pohledu oteplení je kontaktní páka, výsledek simulace ukazuje, že topítko je při přetížení také značně namáháno a je mu při konstrukci zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost.

Výhodnější popis chování teploty nejkritičtějšího místa modelu při přetížení (bod MP 06 – pohyblivý kontakt na straně vývodu, neboli zátěže), lze vynést na časovou osu.



Obrázek 53: Teplotní profil pohyblivého kontaktu na straně vývodu bod MP 06; 4 - 12 × In - L2.

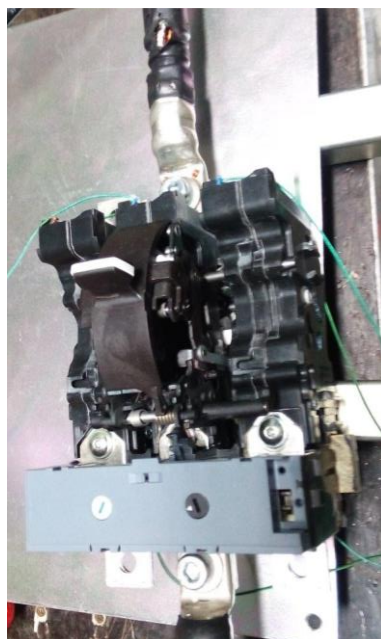
Podle předchozího grafu je jasné zřetelné, že pokud na přístroj působí malé násobky přetížení, tepelné ztráty, které vznikají na kritických místech přístroje, jsou částečně odváděny do dalších prvků a kontaktní páka je tak dostatečně chráněna od poškození. Toto tvrzení ale neplatí pro vyšší hodnoty.

Pokud necháme na přístroj působit vyšší hodnotu přetížení (od cca 8 × In), je zde patrné, že vliv na oddálení kritické teploty pro kontaktní ramínko je pouze funkcí vlastní tepelná kapacity ramínka a přívodního pasu. Tento poznatek už potvrdily jednofázové numerické modely, které zde byly prezentovány dříve.

Ostatní hodnoty numerického výpočtu při přetížení jsou uvedeny v další kapitole, kde jsou simulované hodnoty porovnány s naměřenými anebo až v příloze na str. 97.

6.3 Měření přetížení a ověření numerického modelu přístroje

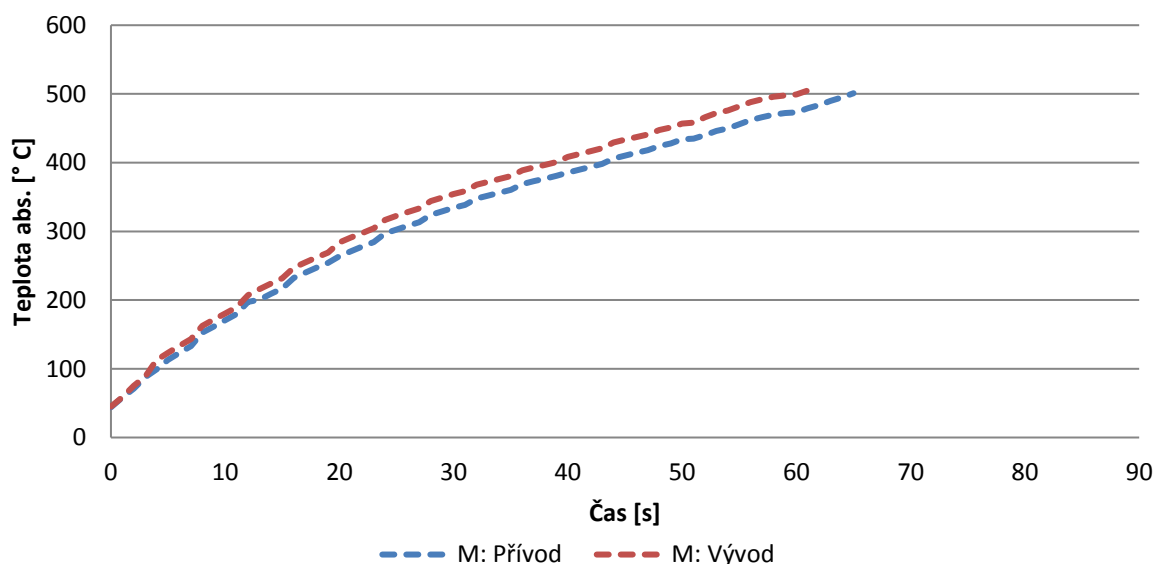
Měření oteplení při přetížení je jeden z nejdůležitějších testů, který ověří funkčnost modelu. Správně navržený model odhalí, zda zvolená metoda spojení kontaktu s nosičem odolá účinku proudu při přetížení a zároveň určí, kde se musí pohybovat maximální čas vypnutí tohoto přetížení.



Obrázek 54: Měření přetížení při $4\times$, $6\times$, $8\times$, $10\times$ a $12\times$ jmenovité hodnoty proudu spínacího přístroje.

V první řadě je zapotřebí upozornit, že páka střadače vypínacího mechanismu byla zablokována, aby nedocházelo k nežádoucímu vypnutí přístroje během zkoušky. Teplota okolí byla stanovena na 40°C a jistič byl zkoušen ze studeného stavu.

Bohužel hned při prvním měření ($4\times I_n$) nebylo vzato v potaz, že nárůst teploty během zkoušky přetížení bude velmi pomalý a přístroj včetně připojení jej bude částečně chladit. Záznam průběhu oteplení je na následujícím grafu.

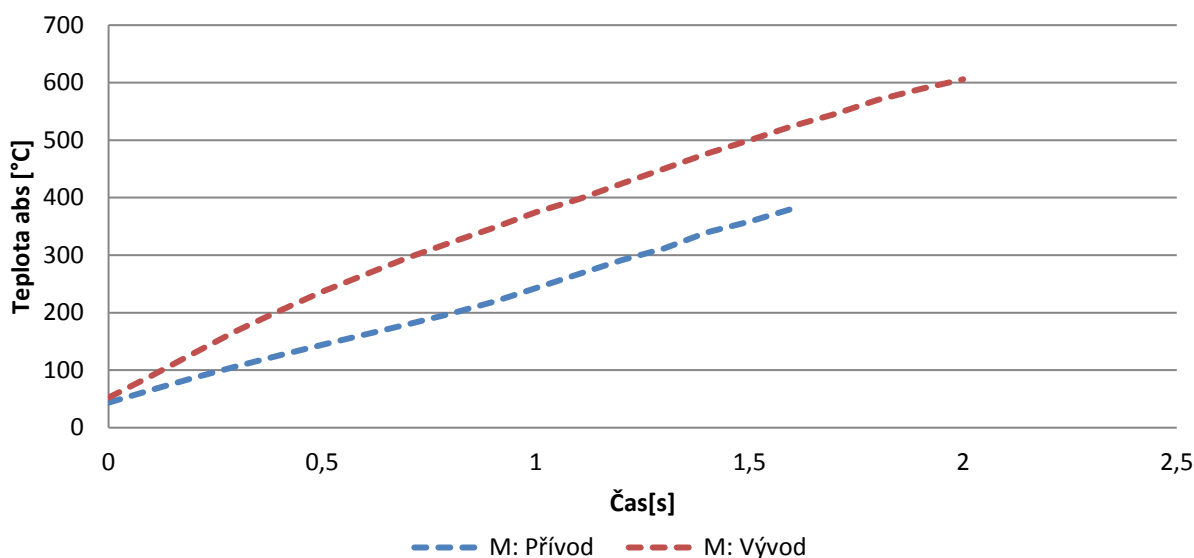


Obrázek 55: Záznam teploty na pohyblivých kontaktech přístroje při přetížení $4\times I_n$.

Přístroj byl připojen do obvodu pomocí vodiče odpovídající normě, o délce 2 metry s průřezem 120 mm^2 a izolací vyrobenou z PVC, kdy výrobce garantuje použití vodiče do teploty $+80^{\circ}\text{C}$. Tato teplota byla dosažena velice brzy a následně tak začalo docházet k tavení izolace. Test, pro svoji

prioritu, nebyl přerušen a po ochlazení přístroje bylo nutné tento vodič vyměnit. Vzhledem k tomu, že tepelná spoušť tohoto přístroje by měla toto přetížení po 22 sekundách přerušit, za normálního provozu tento stav nikdy nenastane.

Jak je vidět na následujícím grafu, oteplení pohyblivých kontaktů nebývá symetrické. Tato odchylka může být způsobena tolerancí na přítlačných pružinách systému, která je doplněna o další pružiny rotačního systému pólkazet, anebo vlastní ovládací mechanismus přístroje, ten totiž pomocí táhla ovládá pouze jednu stranu rotoru.



Obrázek 56: Záznam teploty na pohyblivých kontaktech přístroje při přetížení $12 \times I_n$.

Při měření přetížení ($12 \times I_n$) došlo k upadnutí termočlánu na přívodní straně přístroje v čase 1,6 s a proto již nebylo možné tuto teplotu zaznamenávat. Bylo zapotřebí přístroj otevřít a opět nainstalovat měřící termočlánek.

Přístroj nadále vykazoval uspokojivý technický stav, a proto bylo rozhodnuto dodatečně změřit $14 \times I_n$. Odhadovaný čas měl být pod 1 sekundu.

Tato hodnota proudu byla vysoká, a proto dynamické síly protékajícího elektrického proudu způsobily ihned na začátku testu nadskoky silových kontaktů. Ve stejný okamžik došlo i k přetavení topítka viz následující fotografie.



Obrázek 57: Fyzický stav topítka po zkoušce přetížení, $14 \times I_n$.

Numerický model byl dle předlohy doladěn a při podrobném porovnání je patrné (viz Tabulka 11), že do $8 \times I_n$ je model korektní s chybou do 4,7 %. Pro vyšší hodnoty přetížení již model pracuje s chybou do 8,6 %. Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot je shrnuto v následující tabulce.

Tabulka 11: Porovnání numerického modelu a laboratorního měření přístroje

Pohyblivý kontakt na straně přívodu (MP05) – dosažení 500°C				
$\times I_n$	Měření [s]	Simulace [s]	Δ [s]	Δ [%]
4	65	65,5	0,5	0,8
6	15	15,7	0,7	4,7
8	6,85	6,9	0,05	0,7
10	3,5	3,8	0,3	8,6
12	---	2,4	---	---

Pohyblivý kontakt na straně zátěže (MP 06) – dosažení 500°C				
$\times I_n$	Měření [s]	Simulace [s]	Δ [s]	Δ [%]
4	60	59,5	0,5	0,8
6	14,3	14,7	0,4	2,8
8	6,2	6,1	0,1	1,6
10	3,2	3,4	0,2	6,2
12	1,5	1,6	0,1	6,7

Díky získaným hodnotám z měření a z numerického výpočtu se podařilo vytvořit přehled o oteplení přístroje při přetížení. Tyto poznatky pomohly upřesnit požadavky kladené na bimetal, tepelnou spoušť a hlavně maximální hodnotu vypínacích časů. Výsledná kalibrace tepelné spouště při přetížení je nastavena dle následující tabulky.

Tabulka 12: Nastavené vypínací časy tepelné spouště.

Nastavení tepelné spouště	
$\times I_n$	vypínací čas [s]
4	21,2
6	7,6
8	4,1
10	2,5
12	1,4

Jak je patrné z tabulky, v žádném z případů by se nemělo stát, že dojde k dosažení kritické hodnoty na pohyblivých kontaktech, i když při $12 \times I_n$ je zapotřebí dbát zvýšené pozornosti. Podrobné průběhy oteplení pohyblivých kontaktů, z měření a numerických modelů, jsou vyneseny do grafů a umístěny v příloze na str. 97.

7 SHRUTÍ POZNATKŮ NUMERICKÉHO MODELU

Jednodušší numerický model, který popisuje rozložení teplotního pole na proudové dráze přístroje v ustáleném stavu, je pro různé stavy zatížení popsán v Kapitole 6.1.2 *Porovnání numerického modelu v ustáleném stavu s laboratorním měřením*. Jelikož přechodový odpor na kontaktním styku nebude vždy konstatní, byla tato kapitola rozšířena o Kapitolu 6.1.3: *Vliv přechodového odporu silových kontaktů na oteplení přístroje*. Díky tomuto výstupu lze jasně definovat, že pokud bude přechodový odpor na kontaktním styku v určité toleranci, žádný z elementů na proudové dráze jističe nebude nadměrně namáhán a nebude tak ohrožen jeho vlastní provoz.

Mnohem náročnější numerický model byl vypracován pro analýzu přístroje při přetížení. Tento model je popsán v předchozí kapitole. Jelikož je nutné ověřit opakovatelnosti numerického modelu, je zapotřebí tuto zkoušku opakovat na dalších dvou uvolněných vzorcích. Pro zjednodušení měření bylo vybráno pouze přetížení $6 - 10 \times I_n$. Vypínací spoušť přístroje byla na obou přístrojích zablokována.

Výsledné časy ověřují korektnost modelu pro více vzorků a každé měření bylo opakováno 2×.

Tabulka 13: Dosažení kritické hodnoty 500 °C na pohyblivém kontaktu přístroje na vzorku č. 1.

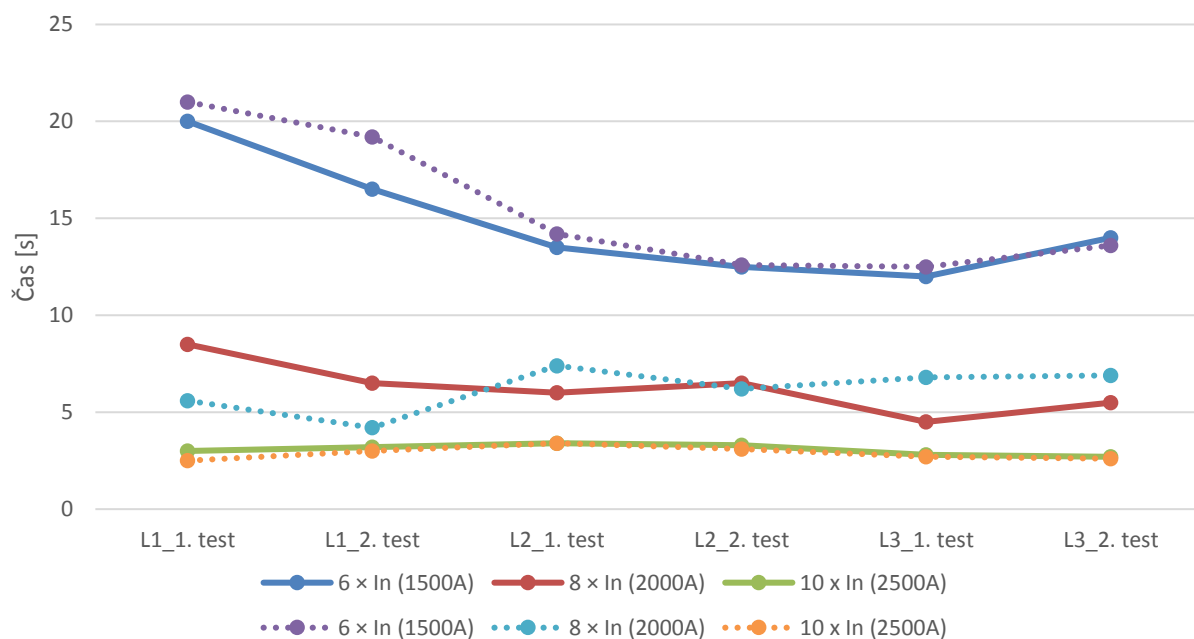
$I_n = 250 \text{ A}$		$6 \times I_n (1500 \text{ A})$			$8 \times I_n (2000 \text{ A})$			$10 \times I_n (2500 \text{ A})$		
Vzorek č. 1		čas [s]	Max. teplota [°C]	Úbytek napětí [mV]	čas [s]	Max. teplota [°C]	Úbytek napětí [mV]	čas [s]	Max. teplota [°C]	Úbytek napětí [mV]
1.	L1 přívod	20,0	449,1	660	8,5	420,6	1100	3,0	376,7	1140
	L1 vývod		502,4			510,2			504,1	
2.	L1 přívod	16,5	426,2	680	6,5	380	870	3,2	474,3	1180
	L1 vývod		505,1			500,5			508,6	
1.	L2 přívod	13,5	473,1	780	6,0	521,8	920	3,4	456,8	1280
	L2 vývod		503,8			478			500	
2.	L2 přívod	12,5	513,9	740	6,5	505,6	1005	3,3	462,1	1420
	L2 vývod		430,7			513,1			501,1	
1.	L3 přívod	12,0	374,5	650	4,5	280,1	880	2,8	271,3	1040
	L3 vývod		506,4			501,8			505,4	
2.	L3 přívod	14,0	355,8	590	5,5	421,5	960	2,7	255,8	1060
	L3 vývod		504,1			518,6			504,4	
Průměrná hodnota		14,8		683	6,3		956	3,1		1187

Měření bylo doplněno o úbytek napětí na svorkách přístroje při přetížení v čase dosažení kritické teploty 500 °C.

Tabulka 14: Dosažení kritické hodnoty 500 °C na pohyblivém kontaktu přístroje na vzorku č. 2.

$I_n = 250 \text{ A}$		$6 \times I_n (1500 \text{ A})$			$8 \times I_n (2000 \text{ A})$			$10 \times I_n (2500 \text{ A})$		
Vzorek č. 2		čas [s]	Max. teplota [°C]	Úbytek napětí [mV]	čas [s]	Max. teplota [°C]	Úbytek napětí [mV]	čas [s]	Max. teplota [°C]	Úbytek napětí [mV]
1.	L1 přívod	21,0	500,4	690	5,6	502,4	950	2,5	500,5	1200
	L1 vývod		480			429,7			373,2	
2.	L1 přívod	19,2	500,2	680	4,2	506,3	920	3,0	503,9	1280
	L1 vývod		465,1			341,7			489,1	
1.	L2 přívod	14,2	368,8	590	7,4	484,1	940	3,4	506	1230
	L2 vývod		501,3			500,7			487,3	
2.	L2 přívod	12,6	500,1	640	6,2	417,9	910	3,1	508	1260
	L2 vývod		443			504,7			464,8	
1.	L3 přívod	12,5	317,4	640	6,8	459	970	2,7	378	1310
	L3 vývod		500,4			505			505	
2.	L3 přívod	13,6	480,4	690	6,9	476,1	950	2,6	371	1360
	L3 vývod		501,4			505,1			501,5	
Průměrná hodnota		15,5		655	6,2		940	2,9		1273

Z naměřených hodnot vyplývá, že neexistuje pravidlo, jaký kontakt dřív dosáhne kritické teploty a vše je záležitost tolerance pružin, dynamických sil proudu, které na kontaktní styk působí a samotné konstrukce jističe.



Obrázek 58: Grafické porovnání časů obou vzorků při kritické teplotě na pohyblivém kontaktu.

Z grafického porovnání je vidět, že hodnoty při $6 \times I_n$ u fáze L1 na obou vzorcích vykazují mnohem delší časy. Není zcela pravděpodobné, že by v obou případech byla tolerance pružin na horní hranici, nebo aby velká dosedací plocha kontaktu způsobila malou hodnotu přechodového odporu, či aby byla čistota kontaktů na tak vysoké úrovni. Tento rozdíl tedy musí být způsoben kombinací všech výše vypsanych příčin. Pro ostatní hodnoty se přístroje chovají stabilně, ve všech třech fázích. Následující tabulka porovnává dodatečně změřené vzorky s původní simulací.

Tabulka 15: Dosažení kritické hodnoty 500 °C na pohyblivém kontaktu (simulace / dodatečné měření na dalších vzorcích)

$\times I_n$	Simulace [s]	Měření na jiných přístrojích Ø [s]
6	14,7 – 15,7	14,8 – 15,5
8	6,1 – 6,9	6,2 – 6,3
10	3,4 – 3,8	2,9 – 3,1

Tabulka jasně dokazuje, že model je do $10 \times I_n$ zcela validní pro jakýkoliv vyrobený jistič a lze jej využít bez omezení. Bohužel pro horní hranici nastavení zkratové spouště není model zcela korektní a výpočty pracují s chybou 9,7 %.

Omezující jisticí přístroje jsou při takto vysokých hodnotách tekoucího proudu ovlivňovány dynamickými účinky elektrického proudu a v kombinaci se samotnou konstrukcí přístroje, tolerancí pružin a různými vrstvami nečistot na kontaktním styku je zapotřebí tento model brát s menší nejistotou. Pokud by bylo odzkoušeno dostatečné množství přístrojů, bylo by možné tuto chybu eliminovat.

Byly vyzkoušeny i jiné hodnoty přetížení mimo uvedené hodnoty v tabulce, avšak výsledky již pro vlastní numerický model nebyly zcela potřebné, nebo byly ovlivněny nepředvídatelným činitelem tak, jako se stalo při posledním měření ($14 \times I_n$).

Pokud bychom chtěli změřit i menší hodnotu přetížení (jako třeba $3 \times I_n$) vyskytl by se stejný problém jako při $4 \times I_n$ – poškození izolace vodiče.

8 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo dokázat, že moderní numerické metody mají své místo při vývoji a výrobě jisticích přístrojů nízkého napětí a lze díky nim ušetřit čas i nemalé finanční náklady, které by bylo nutné vynaložit za reálné zkoušky. Tento cíl byl splněn a v práci je popsána metodika pro tvorbu modelu jisticího přístroje, který v dostatečné míře popisuje chování reálného přístroje z pohledu oteplení při různých provozních stavech. Nespornou výhodou je možnost užití metodického postupu pro jakýkoliv typ výkonového přístroje nízkého napětí.

Aby byl vytvořen spolehlivý komplexní numerický model tepelného pole elektrického přístroje, bylo třeba vyřešit řadu problémů. Řešení ve stručnosti probíhalo v následujících logických krocích.

V první řadě bylo třeba získat vstupní hodnoty pro numerický model provedením řady experimentů. Celkem byly pro experimenty použity 4 jističe – pro získání vstupních hodnot, zejména tepelných a elektrických odporů kontaktů a v průběhu vytváření numerického modelu pro jeho verifikaci při různých provozních stavech.

V úvodní fázi tvorby numerického modelu byl vytvořen jednopólový funkční model spínacího přístroje nízkého napětí o jmenovité hodnotě 250 A. Tento krok byl proveden z důvodu zjednodušení kvůli výpočetním nárokům, které jsou kladeny simulačním programem na výpočetní server, pokud je požadováno zachování originální proudové dráhy a ostatních elementů, které by mohly mít vliv na vlastní oteplení přístroje. Pro správné nastavení okrajových podmínek bylo zapotřebí laboratorně ověřit přechodový odpor kontaktního systému a následně ověřit jeho stálost při budoucích mechanických operacích ($250\times$ zapnout/vypnout). Výsledky tohoto měření byly aplikovány na numerický model.

Dalším krokem byl návrh několika konstrukčních řešení proudovodné dráhy. Z jednotlivých návrhů proudové dráhy bylo provedeno několik numerických výpočtů, kde byl přístroj zatěžován jmenovitou hodnotou 250 A. Získaná data byla analyzována a konfigurace nesplňující očekávané předpoklady vyřazeny. Vyhovující sestavy byly podrobeny transientním simulacím pro různé hodnoty přetížení a opět analyzovány.

Vybraná sestava proudovodné dráhy byla laboratorně ověřena a získané hodnoty implementovány na vlastní 3f model moderního výkonového jističe s rotačním spínacím systémem. Tento model využívá originální geometrii proudové dráhy přístroje včetně pólkazety a není nutné geometrii dodatečně upravovat. Jediná část, která byla zjednodušena, byla plastová základna spínacího přístroje (geometricky nejnáročnější část přístroje). Výsledný model třípólového přístroje byl verifikován pro různé provozní stavy $0,7 - 1,18 I_n$, kde maximální odchylka od fyzického vzorku byla pouze 1,5 K.

Na základě funkčního 3f modelu byl proveden přepočet pro různé hodnoty přechodového odporu spínacího systému. Zde bylo ověřeno, že zvýšené tepelné ztráty nemají významný vliv na topítko tepelné spouště, a není tím ohrožena spolehlivost vypínací jednotky.

Dalším požadavkem numerického výpočtu bylo ověření záměny topítka pro jmenovitou hodnotu spínacího přístroje 250 A. Zde bylo zjištěno, že vliv na vzniklé tepelné ztráty je tak markantní, že by nebylo možné pomocí automatické kalibrační jednotky tepelnou spoušť přístroje seřadit a jistič by byl vyřazen jako nevyhovující. Vlivem záměny topítka by nedošlo k poškození kontaktního systému.

Poslední část práce se zabývá transientní simulací a problémem s připevněním moderních kontaktů ze slitin stříbra na kontaktní ramínko tvrdou pájkou. Pomocí numerického modelu byly stanoveny maximální vypínací časy pro nastavení tepelné spouště, kdy by nedošlo k poškození spínacího systému jističe. Tyto oteplovací křivky byly dodatečně odzkoušeny na dalších dvou přístrojích a bylo ověřeno, že model do $8 \times I_n$ pracuje korektně, avšak pro $10 \times I_n$ je zde mírná odchylka. Jističí přístroj v roce 2015 úspěšně prošel typovou zkouškou a po získání certifikátu byl společností Siemens uveden na trh pod obchodním názvem 3VA5225.

Za původní přínos dizertační práce lze považovat:

- Experimentální výzkum elektrického a tepelného odporu kontaktů na reálném přístroji při různých provozních stavech (nový přístroj, změna při větším přetížení v důsledku změny kontaktní síly a erodované kontakty po zkratové zkoušce).
- Vytvoření komplexního numerického modelu tepelného pole skutečného elektrického přístroje (včetně vlivu měnicího se elektrického a tepelného odporu kontaktu) a jeho verifikace.
- Určení míry vlivu jednotlivých částí proudovodné dráhy na průběh rozložení teploty přístroje.
- Využití numerického modelu při vývoji skutečného spínacího přístroje (návrhy změn jednotlivých částí proudovodné dráhy).
- Návrh konstrukčního řešení jednotlivých dílů, které vykazují lepší chování v různých provozních stavech, pomocí vytvořeného numerického modelu.

Za praktický přínos této práce lze považovat zpracovanou metodiku pro tvorbu numerických modelů v oblasti proudění kapalin a sdílení tepla na spínacích přístrojích nízkého napětí. Dalším přínosem jsou jednotlivé modely jističího přístroje v prostředí SOLIDWORKS – Flow Simulation. Mezi dílčí přínosy práce lze zařadit:

- Stanovení teplotního profilu proudové dráhy spínacího přístroje pro různé provozní stavy.
- Stanovení vlivu přechodového odporu na oteplení přívodních svorek a bimetalu.
- Nalezení nového kritického místa proudové dráhy při přetížení – topítko.
- Analýza jednotlivých částí moderního spínacího přístroje.
- Verifikace numerického modelu při ustáleném stavu.
- Verifikace numerického modelu při přetížení.
- Výrazné snížení potřebných vzorků pro ověření návrhu proudovodné dráhy užitím numerického modelu (pouhé čtyři kusy oproti desítkám kusů nutných v minulosti), a tedy i značných finančních prostředků (cena jednoho kusu se pohybuje okolo 2000 EUR).

Výsledky této práce byly publikovány v rámci projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci programu NPU I (projekt č. LO1210), Grantové agentury České republiky v rámci projektu GA15-14829S Studium termodynamických a elektromagnetických procesů ve spínacích přístrojích nízkého napětí. Řešení probíhalo ve výzkumně infrastrukturu LM2015092 – CVVOZE Power Laboratories.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60947-1. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 1: Všeobecná ustanovení*. 4. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [2] ČSN EN 60947-2. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 2: Jističe*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [3] SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT USA. Double-breaking contact system for a low voltage circuit breaker, a molded case circuit breaker comprising the double-breaking contact system, and a method for breaking a circuit. Původce: FERREE, James. USA. Patentový spis US8159319 B2. 24.1.2007.
- [4] SCHNEIDER ELECTRIC USA INC. Quad break modular circuit breaker interrupter. Původce: SALAHEDDINE, Faik. USA. Patentový spis US8350168 B2. 30.6.2010.
- [5] SCHNEIDER ELECTRIC. Koordinace jisticích přístrojů nn: Selektivita a kaskádování. In: *zdroje.elektrika.cz* [online]. Brno: Schneider Electric CZ, 2006. [cit. 5.5.2018]. Dostupné z: <https://zdroje.elektrika.cz/book/schneider-electric-selektivita-kaskadovani/>
- [6] BERGHEAU, Jean-Michel a FORTUNIER, Roland. *Finite element simulation of heat transfer*. London: ISTE Ltd., 2008. ISBN 978-1-84821-053-0.
- [7] DĚDEK, Libor a DĚDKOVÁ, Jarmila. *Elektromagnetismus*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1106-6.
- [8] HOLM, Ragner. *Electric Contacts: Theory and Applications*. Berlin: Springer Verlag, 1976. ISBN 978-3-642-05708-3.
- [9] Hungarian copper promotion centre. Contact resistance, temperature rise and losses of the electrical terminals. In: *medportal.sk* [online] Slovensko: Medportal, 2007. [cit. 1.6.2015]. Dostupné z: http://www.medportal.sk/system/files/publikace/prechodovy_odpor.pdf
- [10] KAŠPÁREK, Karel. Novinky od firmy Moeller – jističe a odpínače od 32 A až do 1 600 A. *Elektro, časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2003, (8) [cit. 4.2.2017]. ISSN: 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/novinky-od-firmy-moeller-jistice-a-odpinace-od-32-a-az-do-1-600-a--14387>
- [11] DOSTÁL, Martin. Výkonové jističe Compact NS – více výhod za stejnou cenu!. *Elektro, časopis pro elektrotechniku*. [online]. Praha: FCC PUBLIC, 2006, (8) [cit. 6.2.2017]. ISSN: 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vykonove-jistice-compact-ns-vice-vyhod-za-stejnou-cenu--13013>
- [12] Engineering ToolBox. Resistivity and Conductivity - Temperature Coefficients for Common Materials. *Engineeringtoolbox.com* [online]. 2003. [cit. 20.2.2017]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d_418.html

- [13] ANHEUSER, Michael, BECKERT, Thomas a KOSSE, Sylvio. Electric Arcs in Switchgear – Theory, Numerical Simulation and Experiments. In: *XIXth Symposium on Physics of Switching Arc*. Brno: Brno University of Technology, 2011, s. 15-21. ISBN 978-80-214-4293-1.
- [14] KHEILOVÁ, Milena. *Termodynamika*. 2. vyd. Brno: VUTUM, 1998. ISBN 80-214-0997-5.
- [15] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika*, 2. přeprac. vyd. Brno: VUTUM, 2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [16] MELEN, Jaroslav. Podmínky uvádění do provozu (nejen) elektrických zařízení: Standardizace. *Elektro, časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha FCC PUBLIC, 2002, (7) [cit. 1.11.2017]. ISSN: 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/podminky-uvadeni-do-provozu-nejen-elektrickych-zarizeni--14807>
- [17] FALTUS, Ivo. Příručka elektrotechnika: Jističí přístroje I. In: *oez.cz* [online]. Letohrad: OEZ, 2012 [cit. 4.11.2017]. Dostupné z: http://www.oez.cz/file/123_1_1/
- [18] FALTUS, Ivo. Příručka elektrotechnika: Jističí přístroje II. In: *oez.cz* [online]. Letohrad: OEZ, 2013 [cit. 4.12.2017]. Dostupné z: http://www.oez.cz/file/604_1_1/
- [19] SLADE, Paul. *Electrical Contacts: Principles and Applications*. 2. vyd. Boca Raton: Taylor & Francis, 2014. ISBN 1439881316.
- [20] AMI DODUCO. *Ami Doduco Data Book of Electrical Contacts*. Pforzheim: Ami Doduco GmbH, 2010. ISBN 978-3-7987-0404-6.
- [21] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988. ISBN 55-569/1-88.
- [22] GALDI, Giovanni P. *An Introduction to the Mathematical Theory of the Navier-Stokes Equations I*. New York: Springer Verlag, 1994 Springer Tracts in Natural Philosophy, sv. 38. ISBN: 978-1-4757-3866-7.
- [23] BULÍČEK, Miroslav, aj. *Úvod do moderní teorie parciálních diferenciálních rovnic*. [online]. 2018 [cit. 4.9.2018]. Dostupné z: http://www.karlin.mff.cuni.cz/~pokorny/moderni_teorie.pdf
- [24] FERZIGER, Joel H. a PERIĆ, M.. *Computational methods for fluid dynamics*. 3. rev. vyd. New York: Springer, 2002. ISBN 3540420746.
- [25] ATOM POWER, AS3P100 Gen. 2 Preliminary. In: *atompower.com* [online]. 6.12.2018 [cit. 8.12.2018]. Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/1baea3_200808efa26a4c4b96dc4d6ad6e824f4.pdf
- [26] DOSTÁL, Lukáš. Analysis of temperature on the rotary breaking system of a molded case circuit breaker at nominal current and overload. In: *XXth Symposium on Physics of*

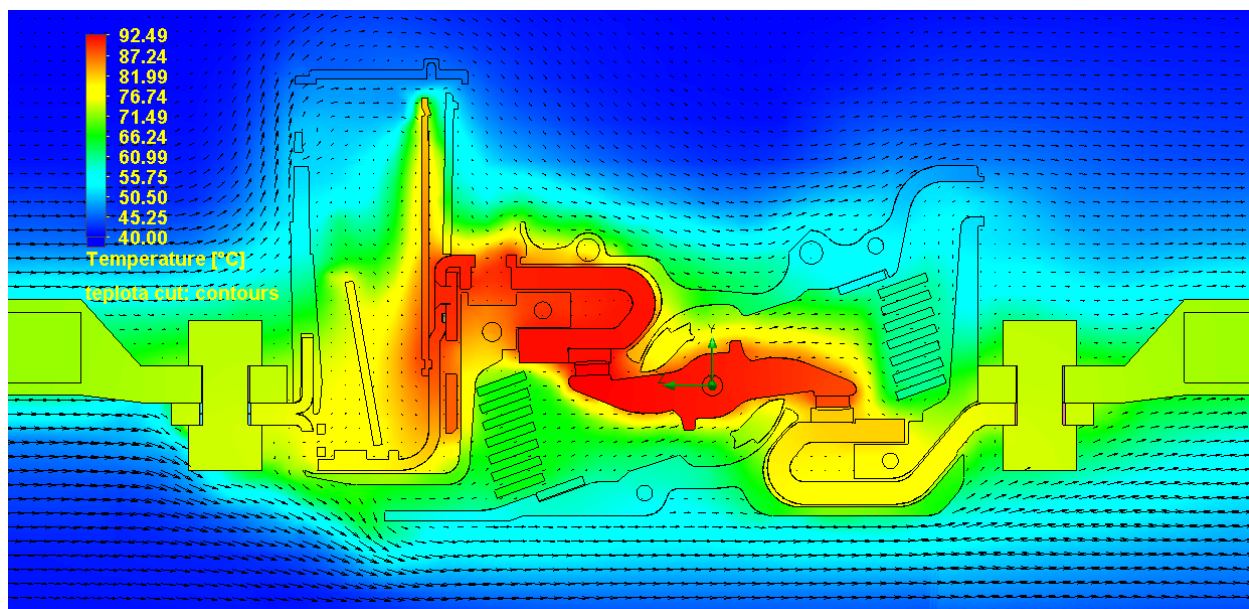
Switching Arc. Brno: Brno University of Technology, 2013, s. 122-125. ISBN 978-80-214-4753-0.

- [27] DOSTÁL, Lukáš, DOHNAL, Petr a VALENTA, Jiří. Change of the thermal profile in the modern MCCB by the different electrical contact resistance. *Plasma Physics and Technology*, 2015, roč. 2, č. 3, s. 77-81. ISSN: 2336-2626.
- [28] DOSTÁL, Lukáš; VALENTA, Jiří a ŠIMEK, David. Low-Voltage Circuit-Breaker Behavior under Overload Conditions. *Plasma Physics and Technology*, 2018, roč. 5, č. 1, s. 1-4. ISSN: 2336-2626.

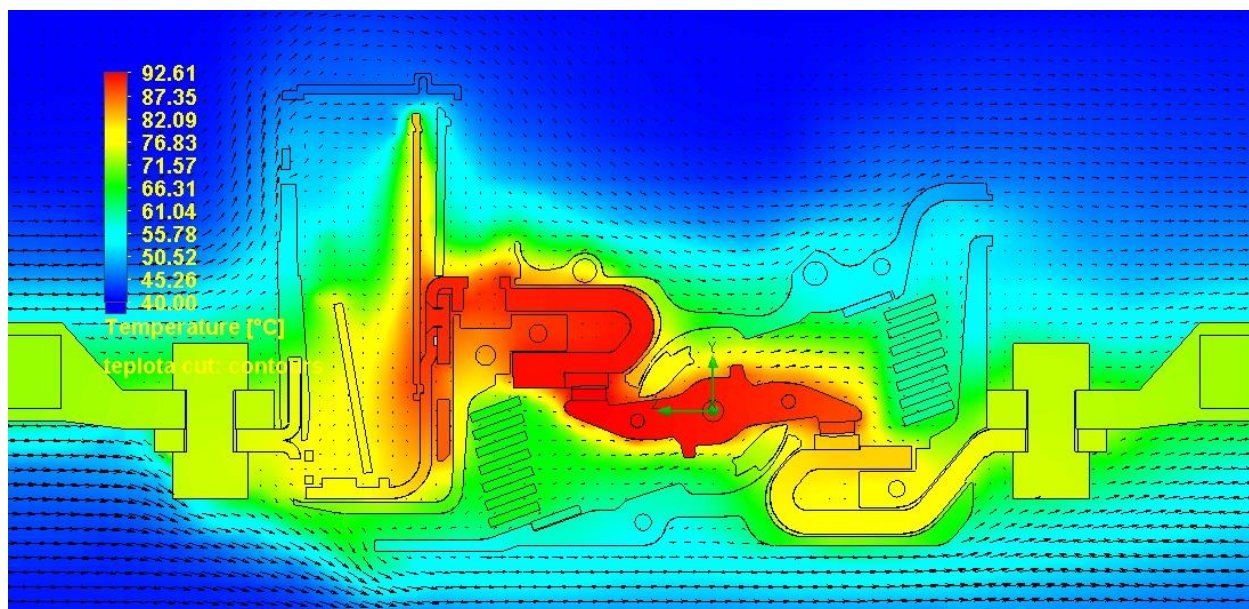
PŘÍLOHA A ZJEDNODUŠENÝ MODEL SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE

Ustálený stav – porovnání silových kontaktů

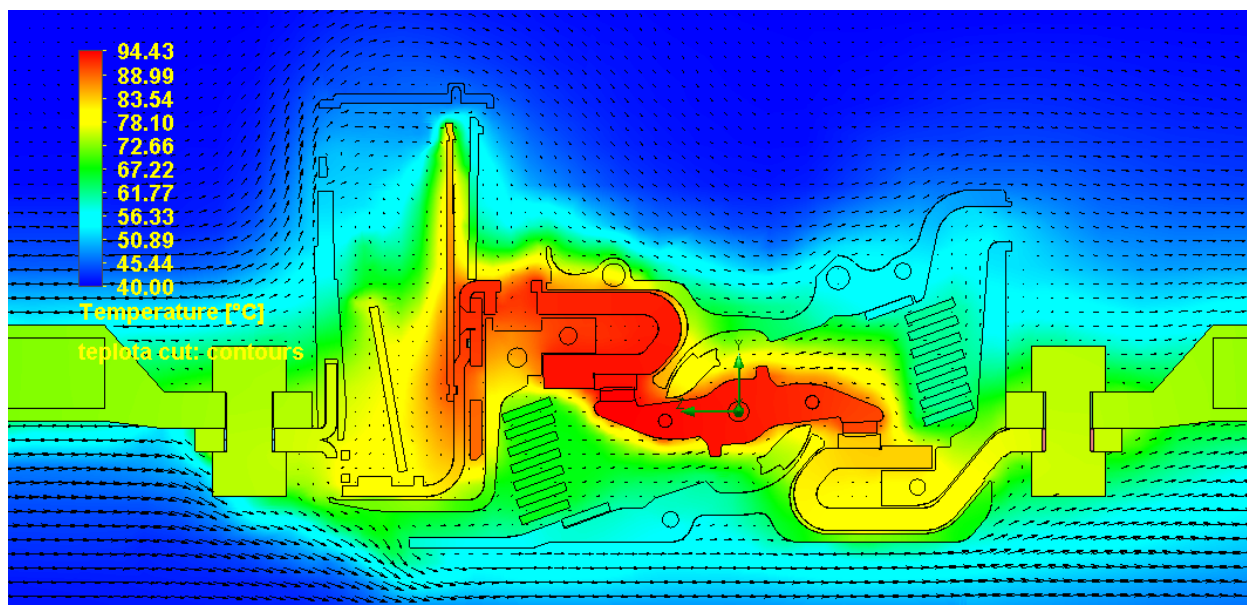
Kontaktní sada č. 1 – ustálený stav



Kontaktní sada č. 2 – ustálený stav

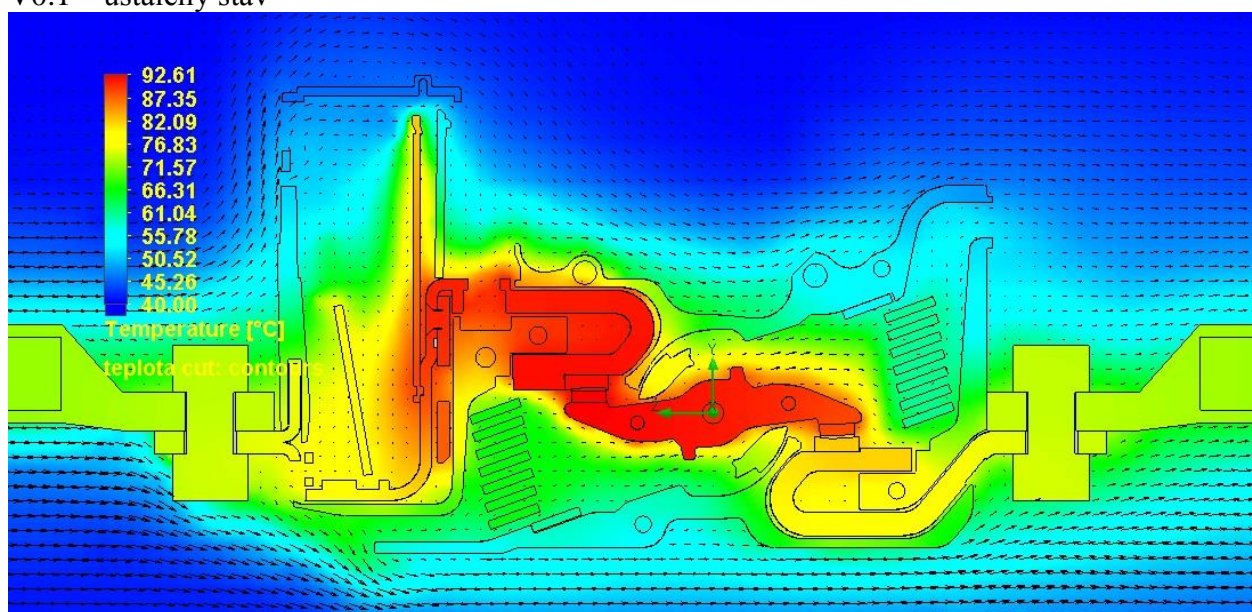


Kontaktní sada č. 3 – ustálený stav

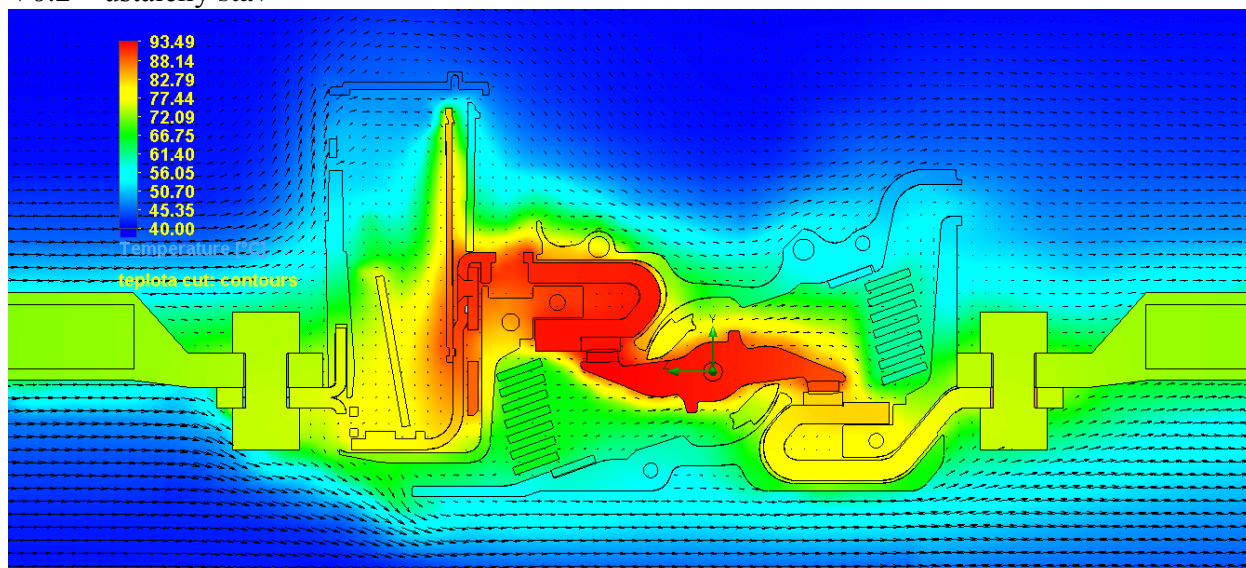


Ustálený stav – porovnání kontaktního ramínka

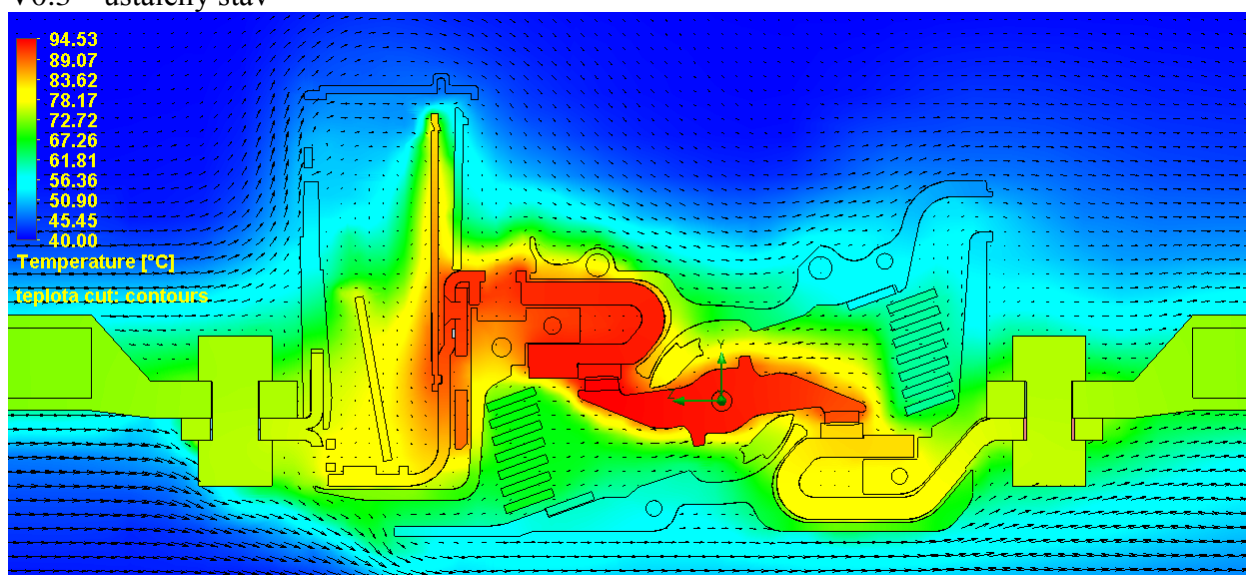
V0.1 – ustálený stav



V0.2 – ustálený stav

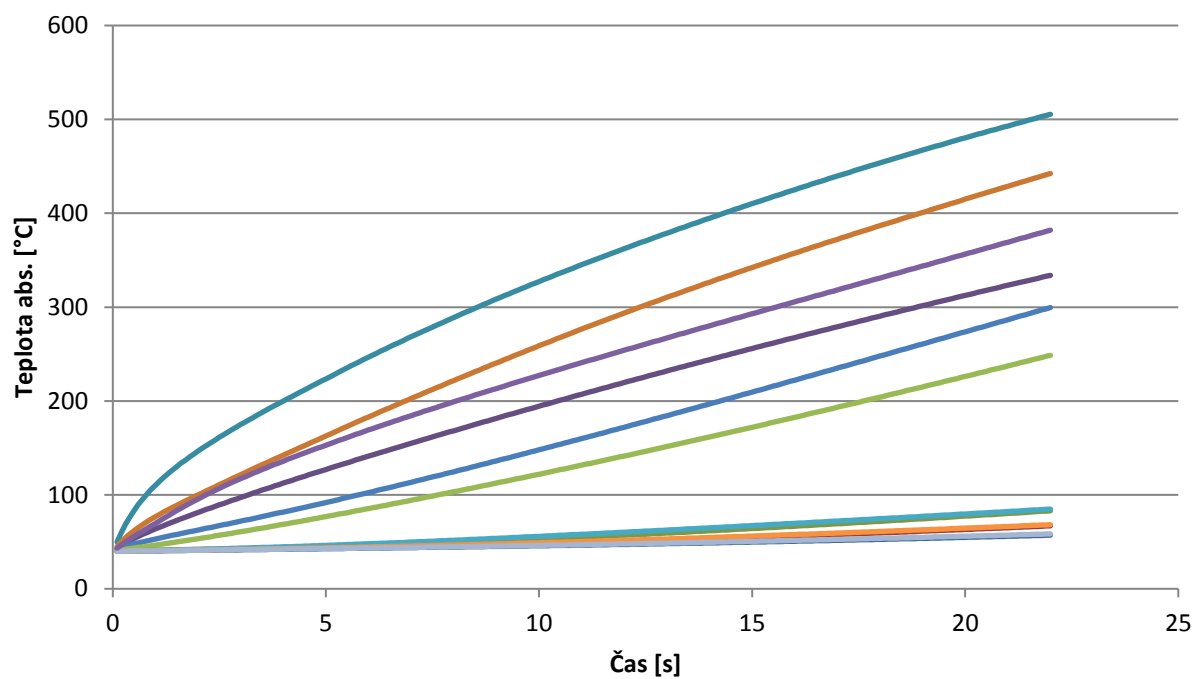


V0.3 – ustálený stav

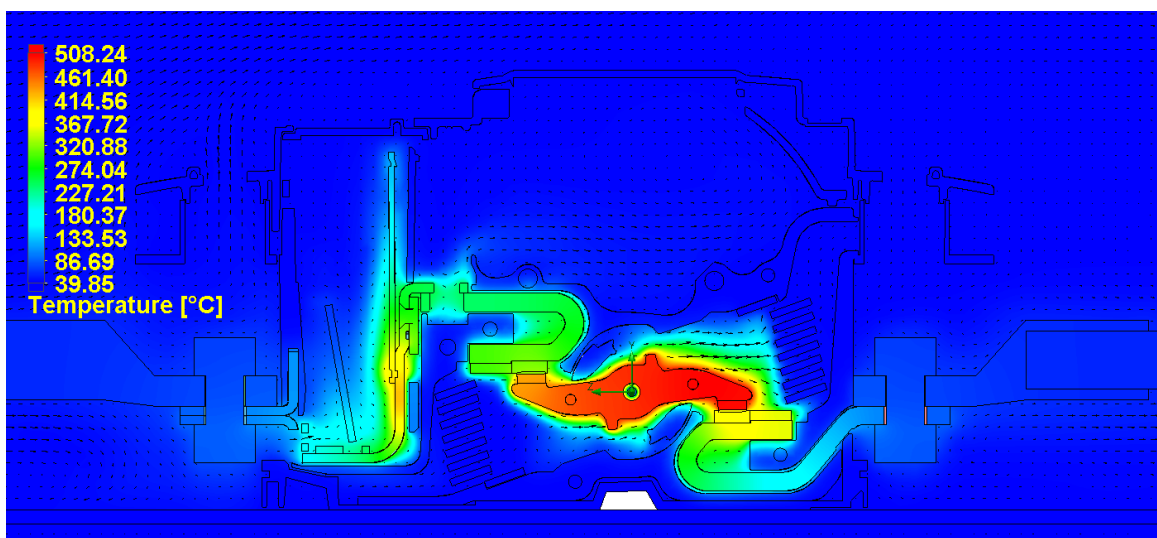


Přetížení – porovnání modelu V0.1 a V1.1

6× In - V0.1

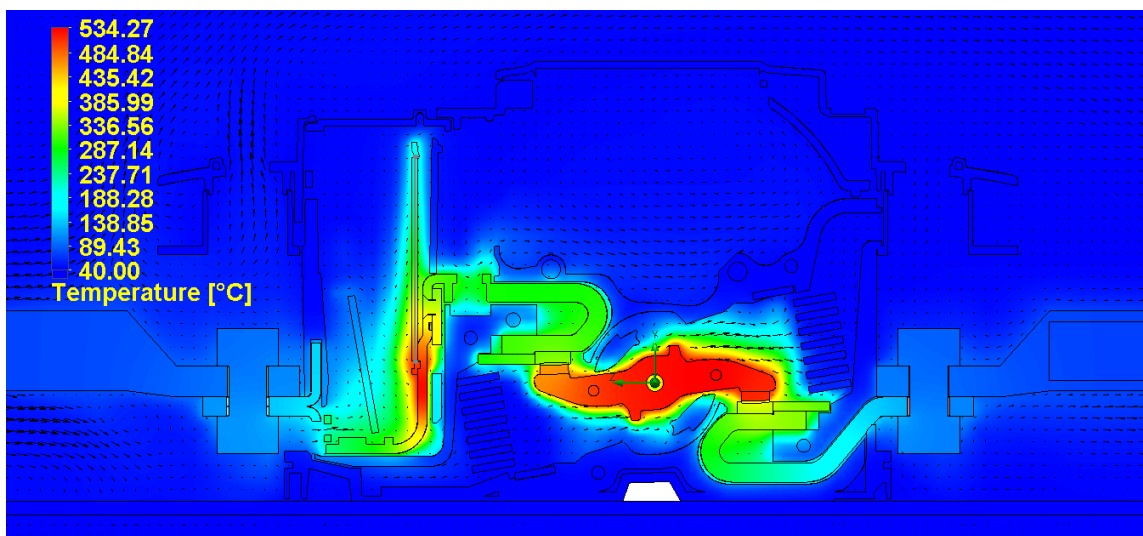
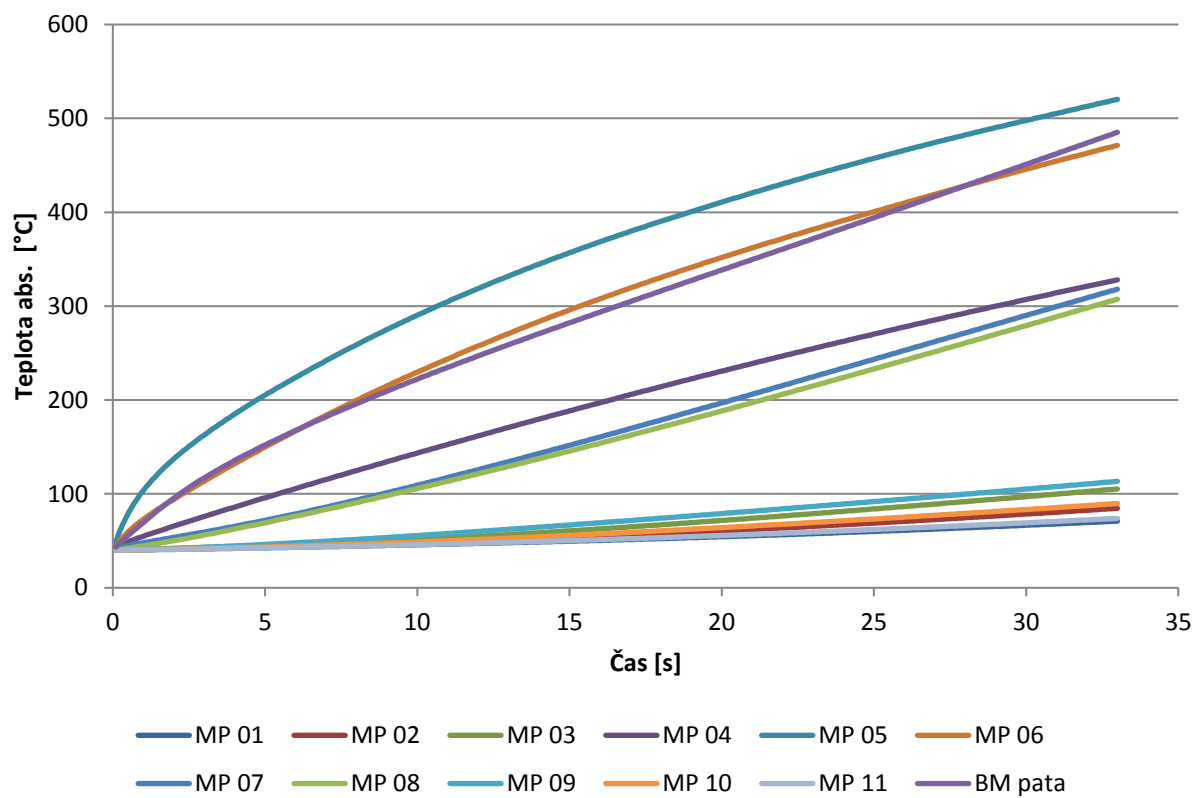


MP 01 MP 02 MP 03 MP 04 MP 05 MP 06
MP 07 MP 08 MP 09 MP 10 MP 11 BM pata



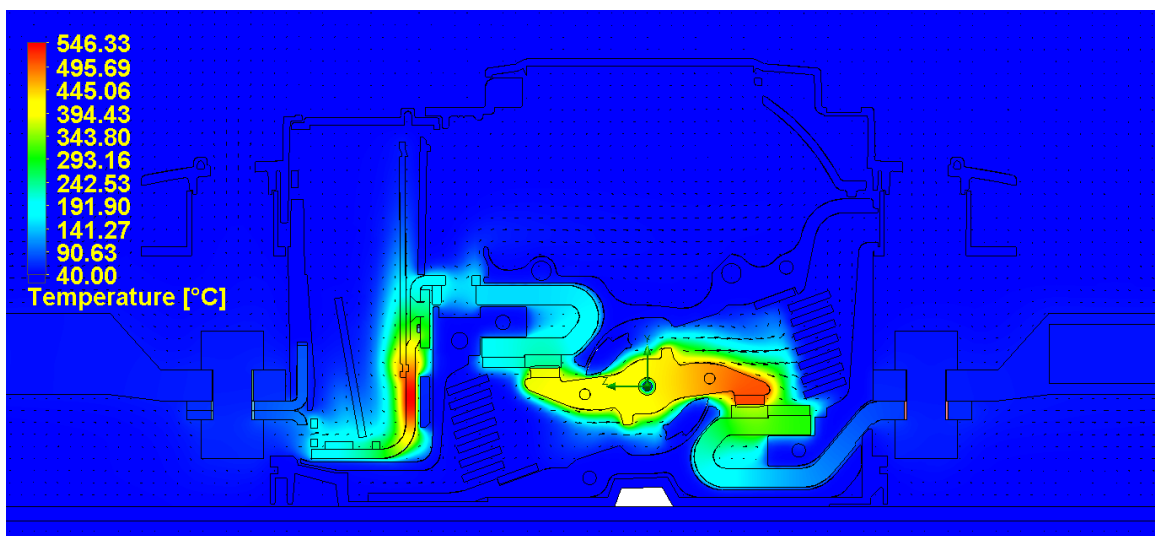
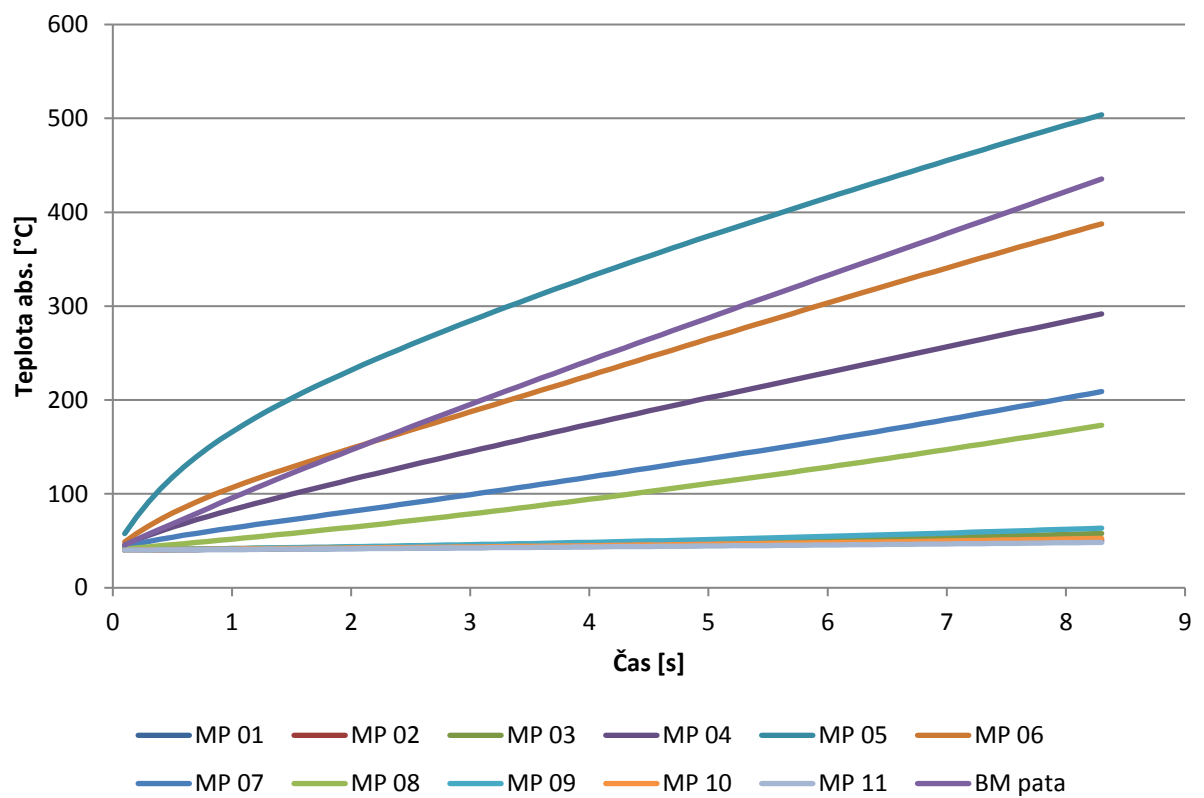
t = 22 s

6x In - V1.1



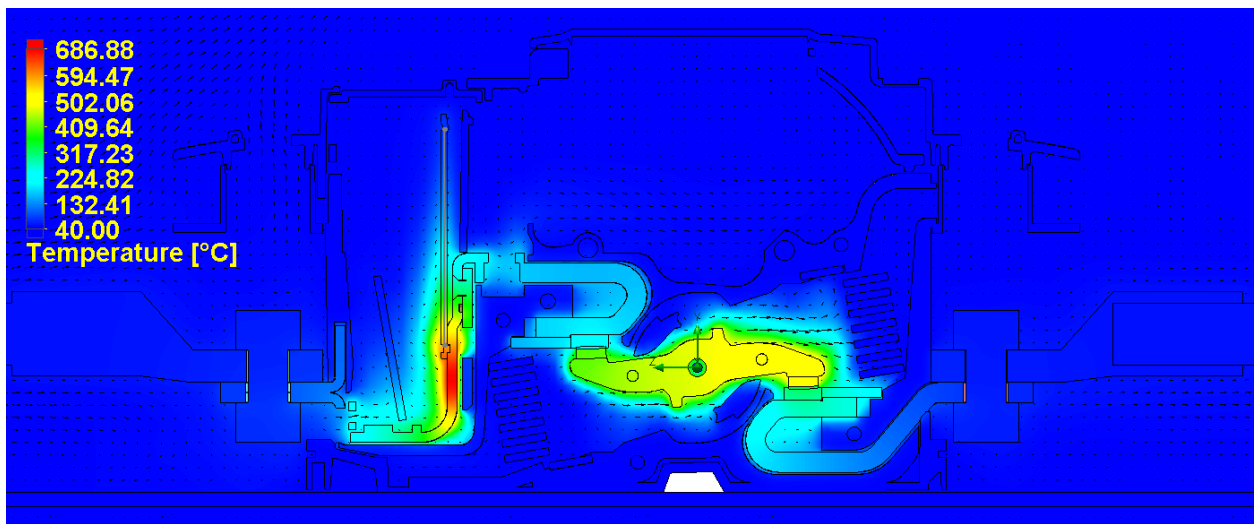
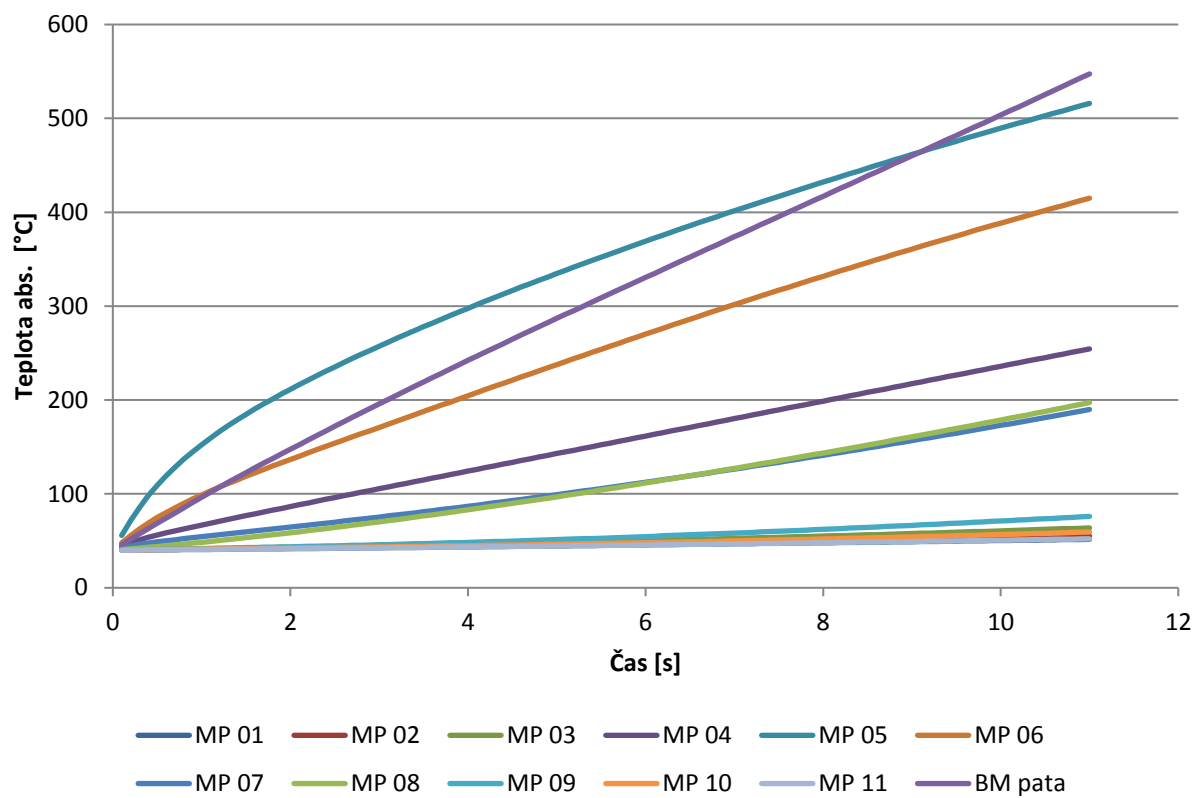
$t = 33$ s

8x In - V0.1



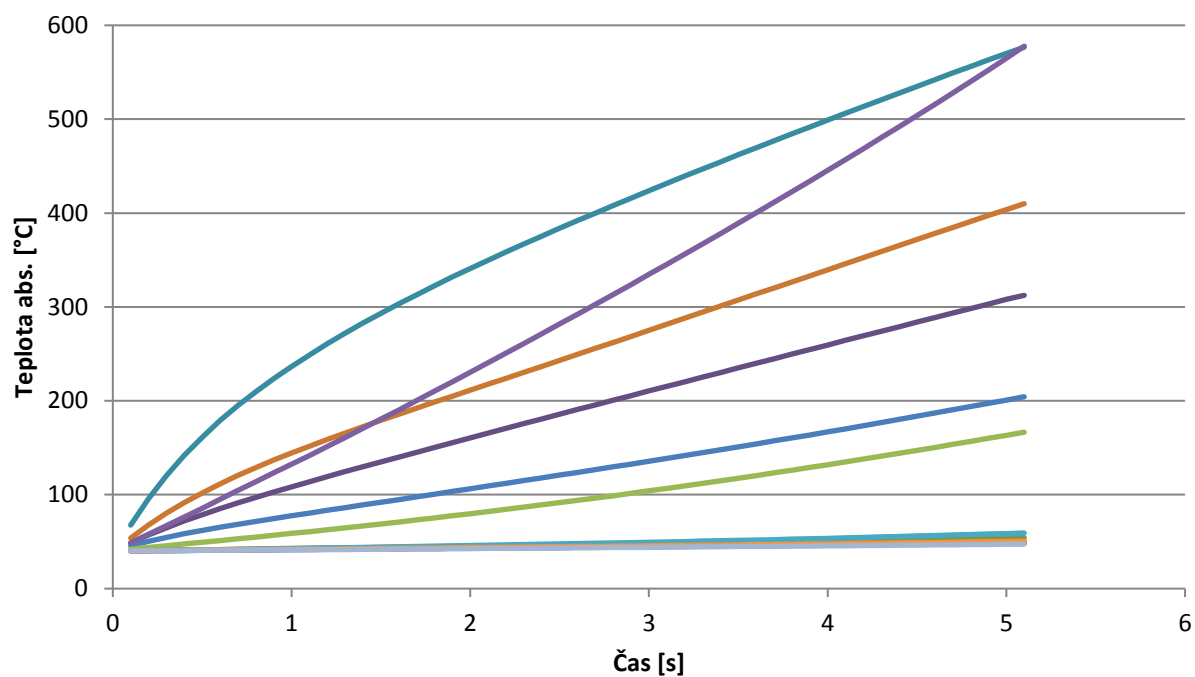
t = 8,3 s

8x In - V1.1

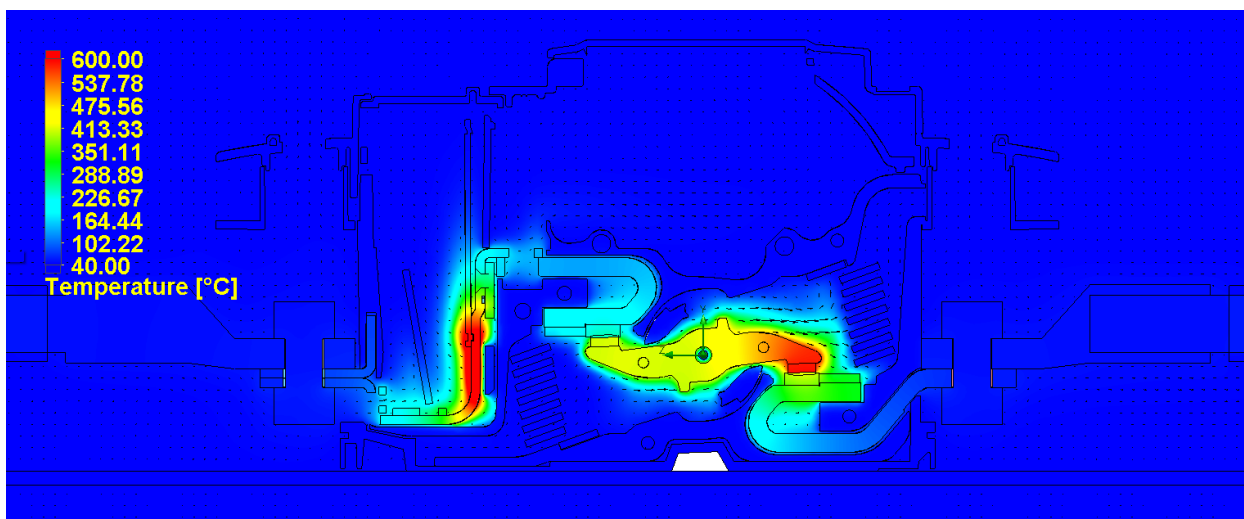


t = 11 s

10x In - V0.1

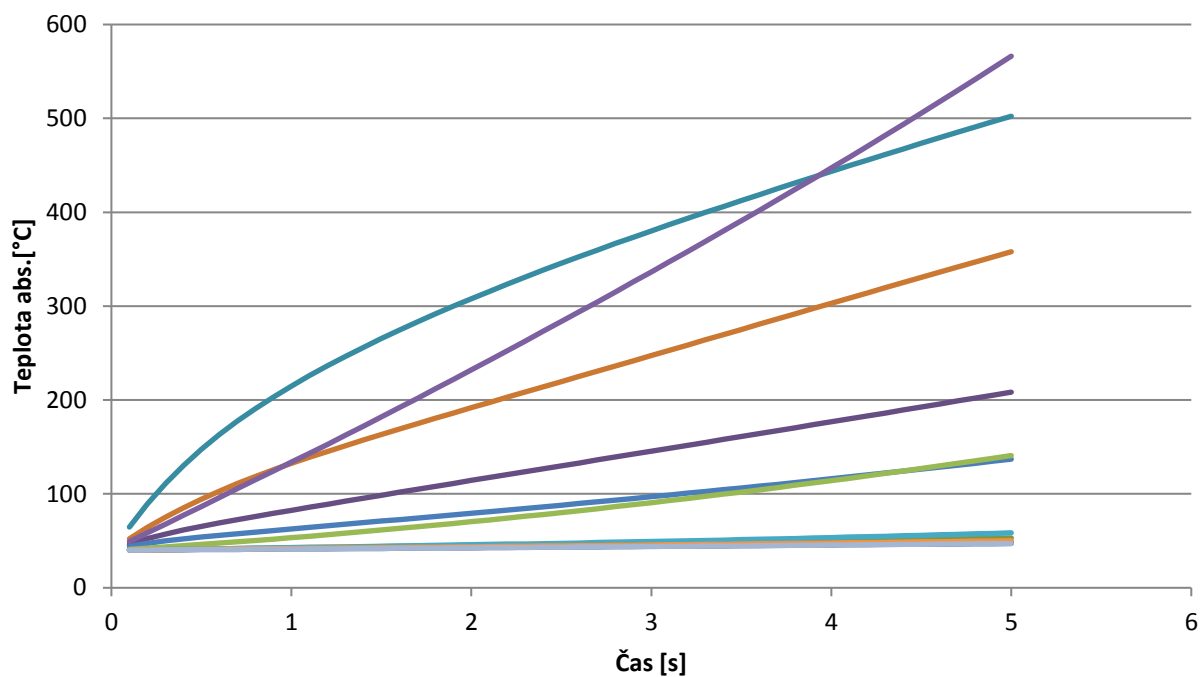


MP 01 MP 02 MP 03 MP 04 MP 05 MP 06
MP 07 MP 08 MP 09 MP 10 MP 11 BM pata

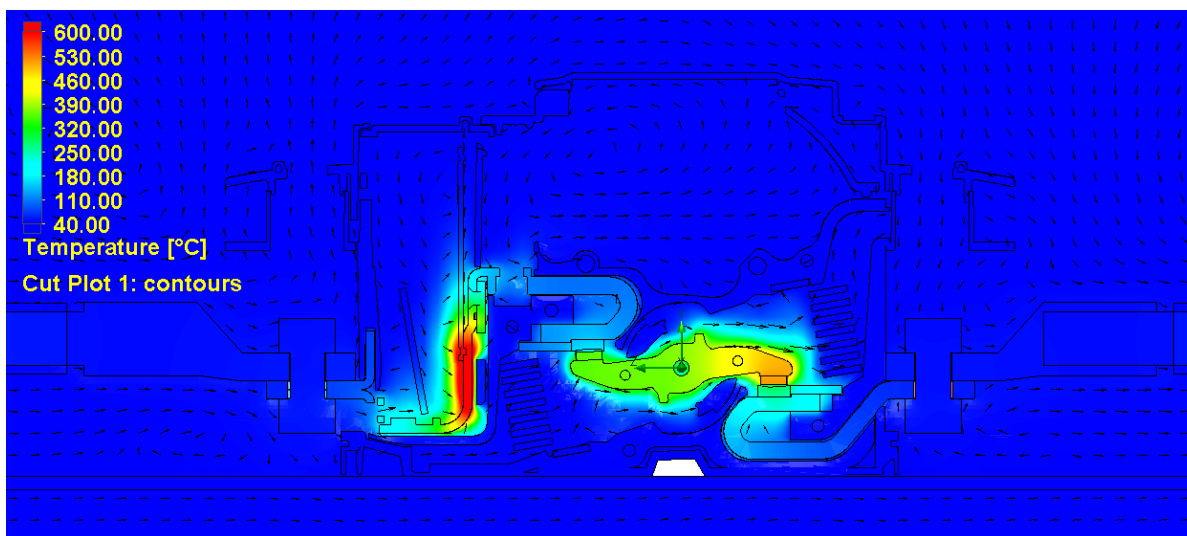


t = 5,1 s

10× In - V1.1



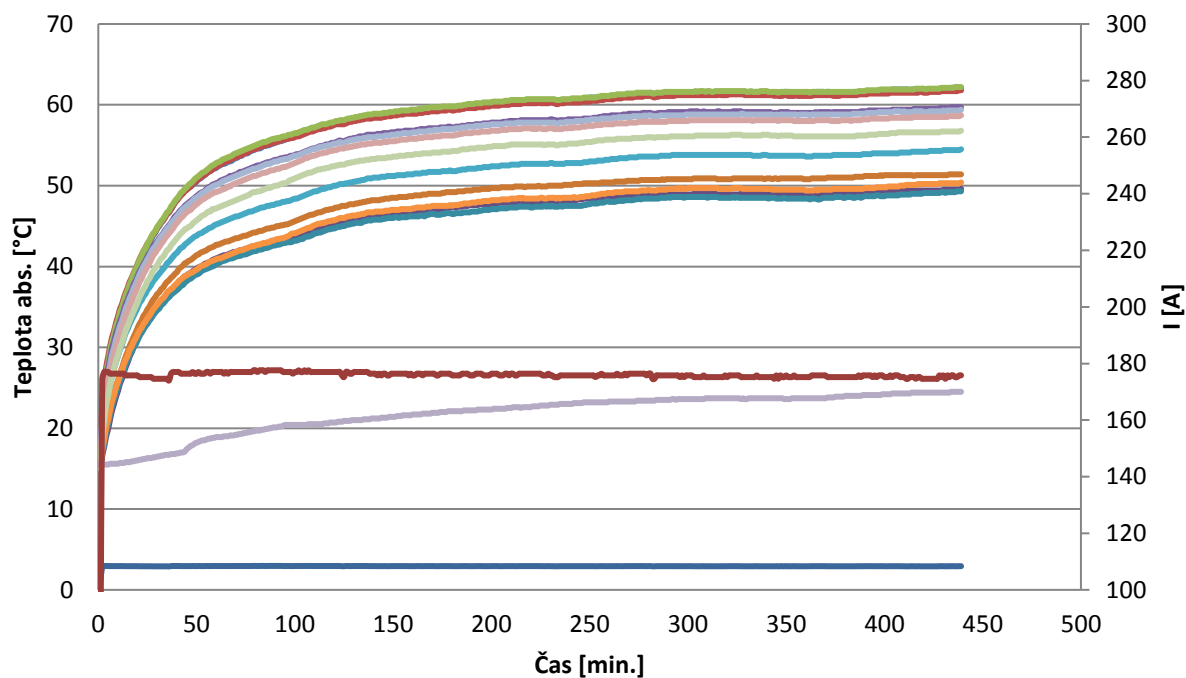
MP 01 MP 02 MP 03 MP 04 MP 05 MP 06
MP 07 MP 08 MP 09 MP 10 MP 11 BM pata



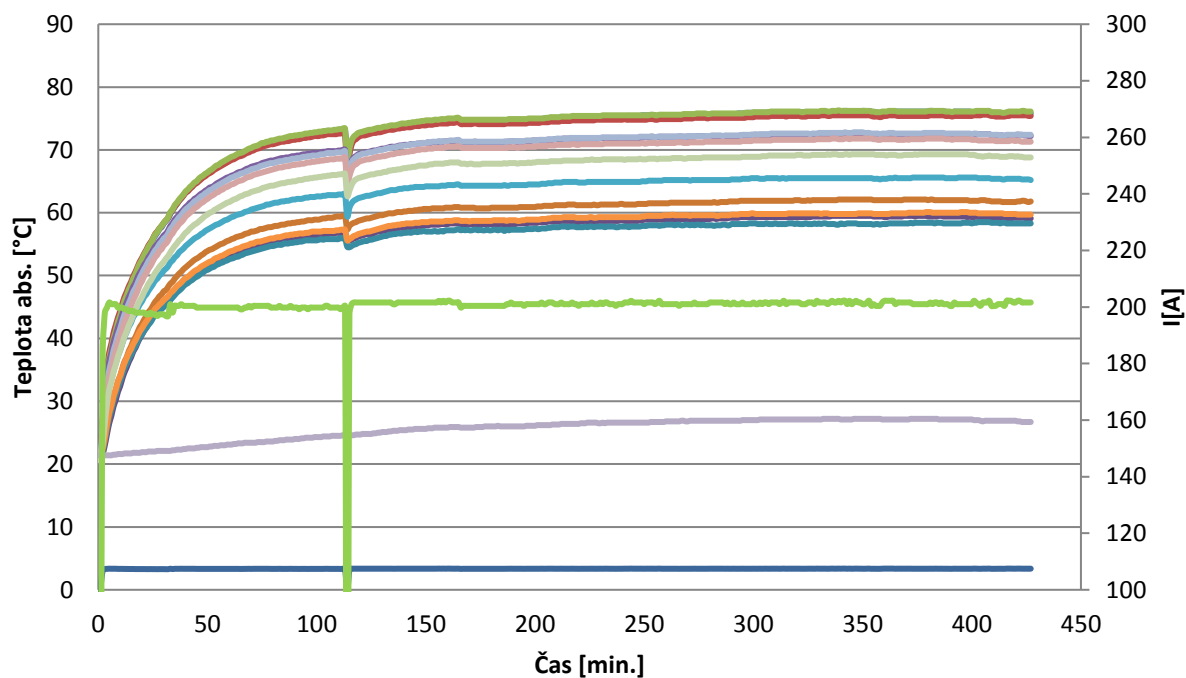
$t = 5$ s

PŘÍLOHA B LABORATORNÍ MĚŘENÍ OTEPLENÍ

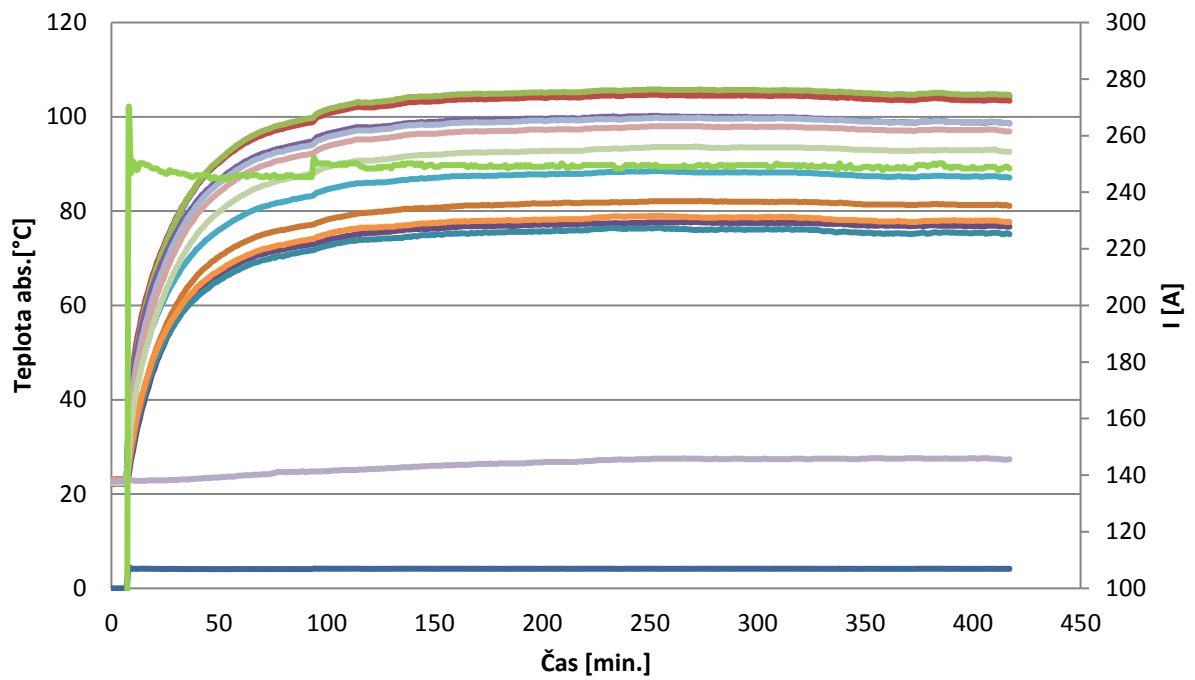
Oteplení $0,7 \times I_n$



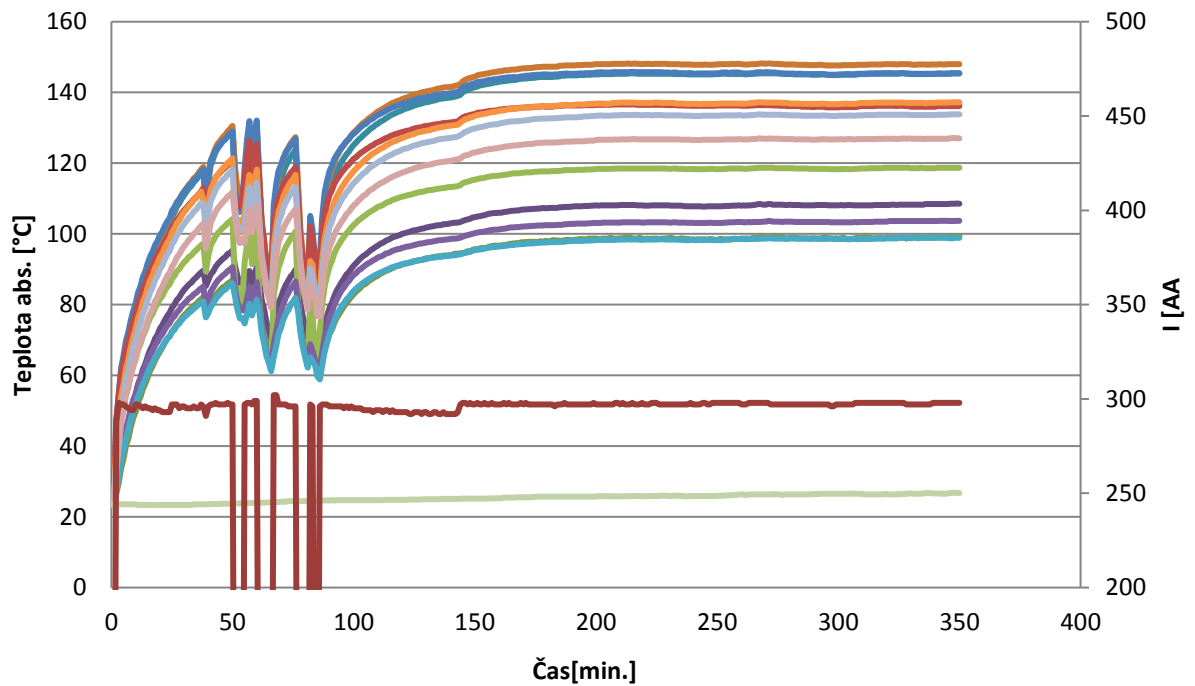
Oteplení $0,8 \times I_n$



Oteplení 1,0 x In

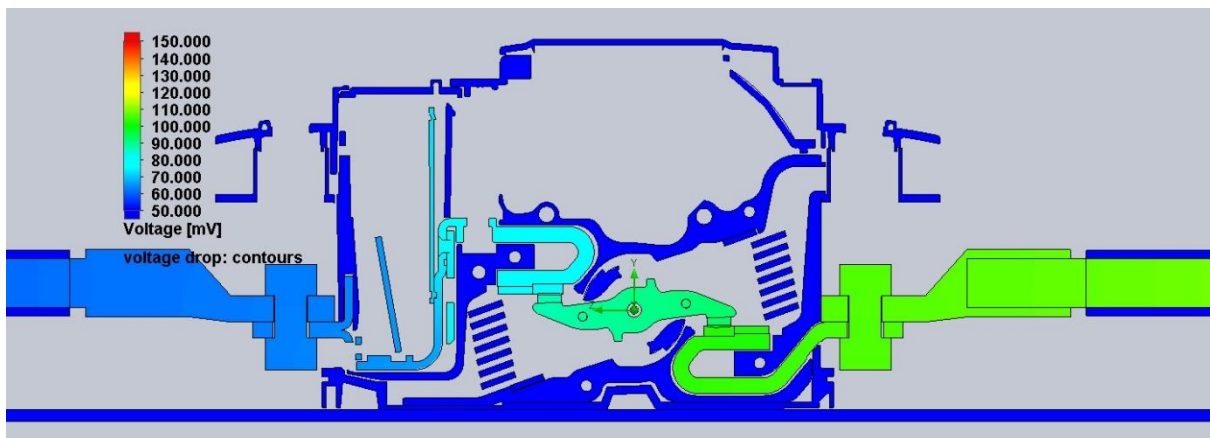
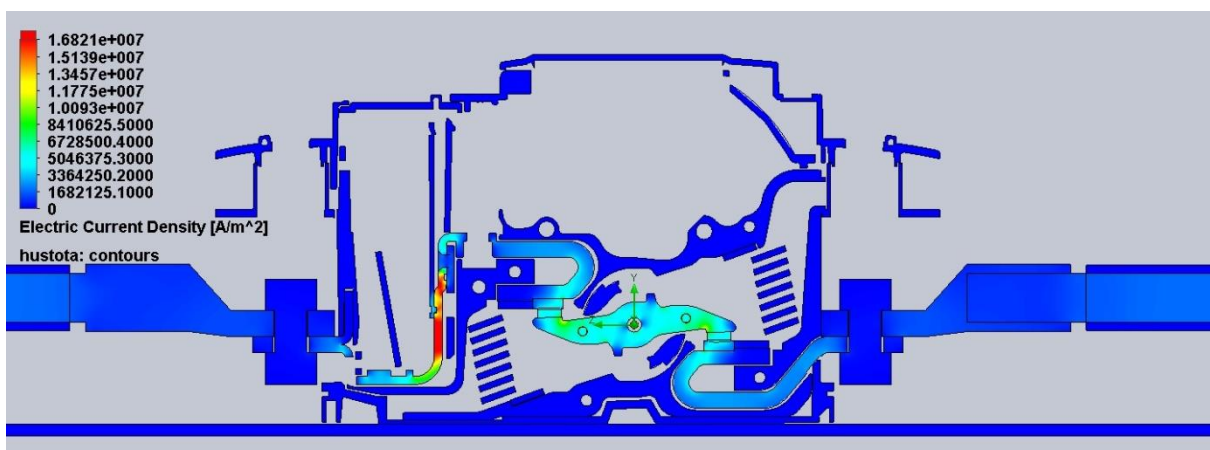
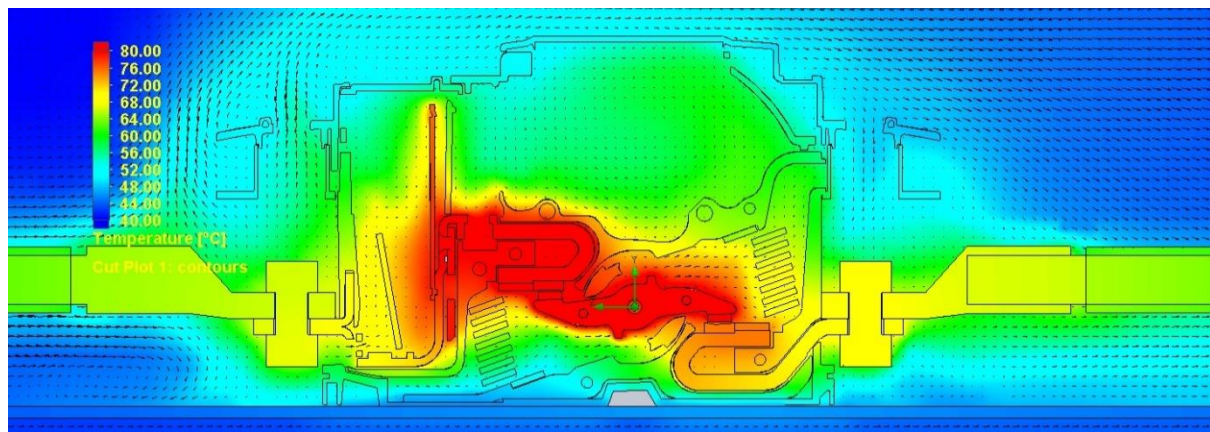


Oteplení 1,18 x In

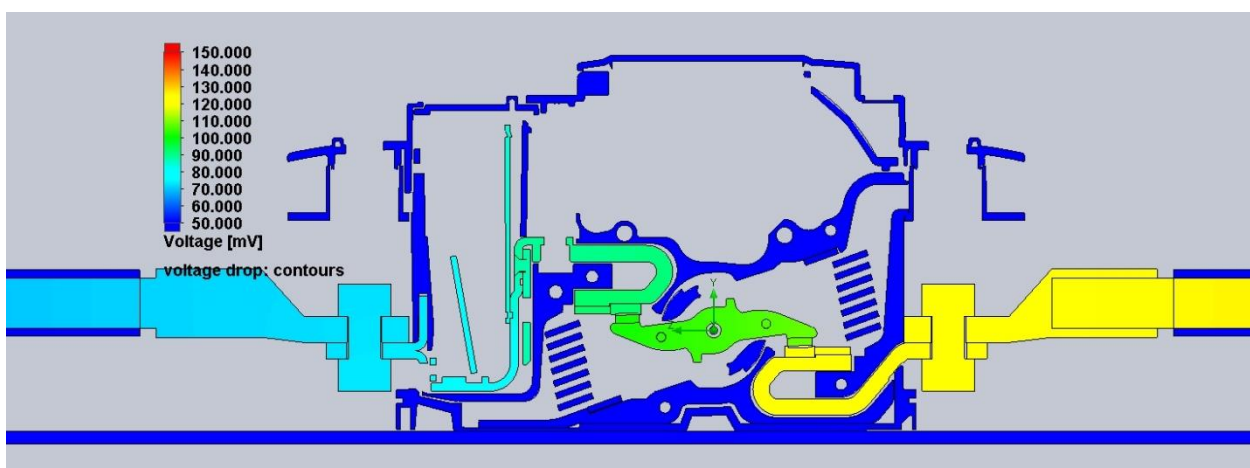
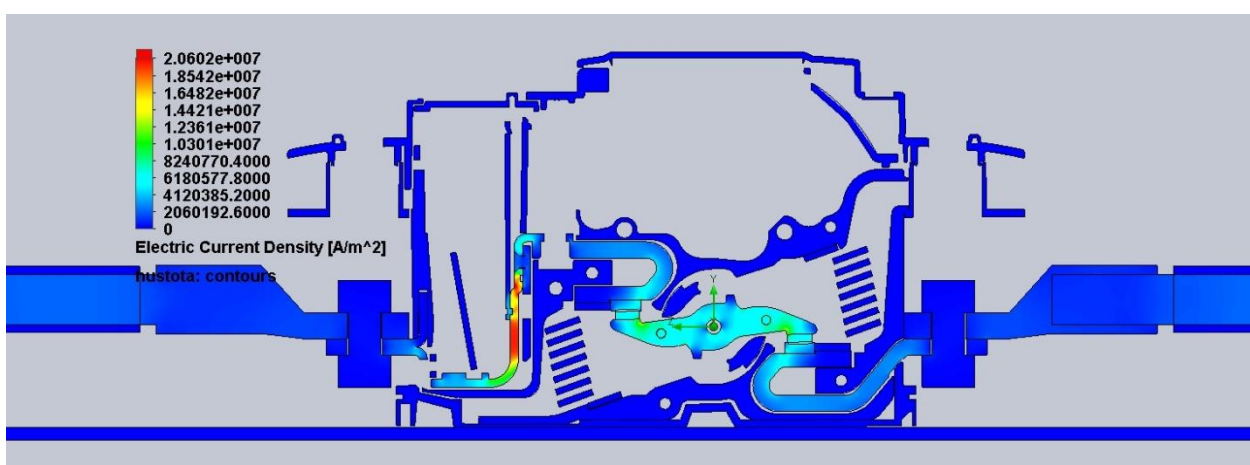
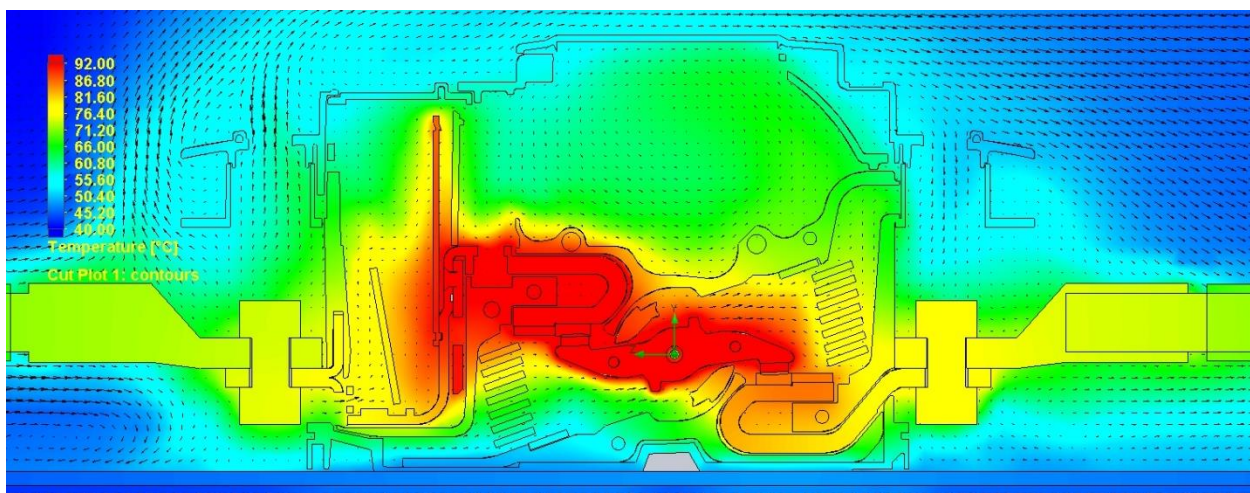


PŘÍLOHA C PLNOHODNOTNÝ 3F MODEL JISTIČE

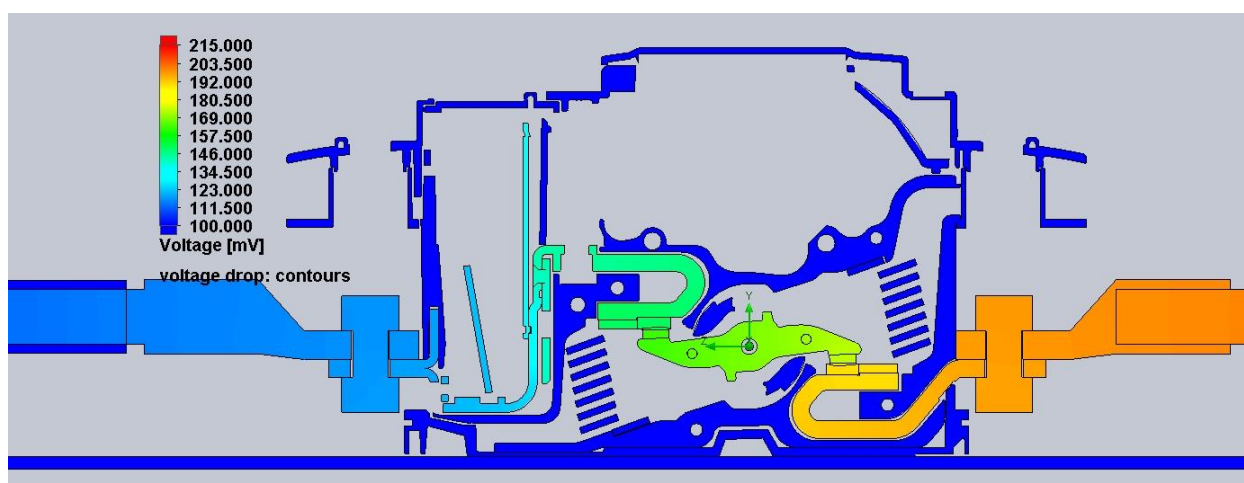
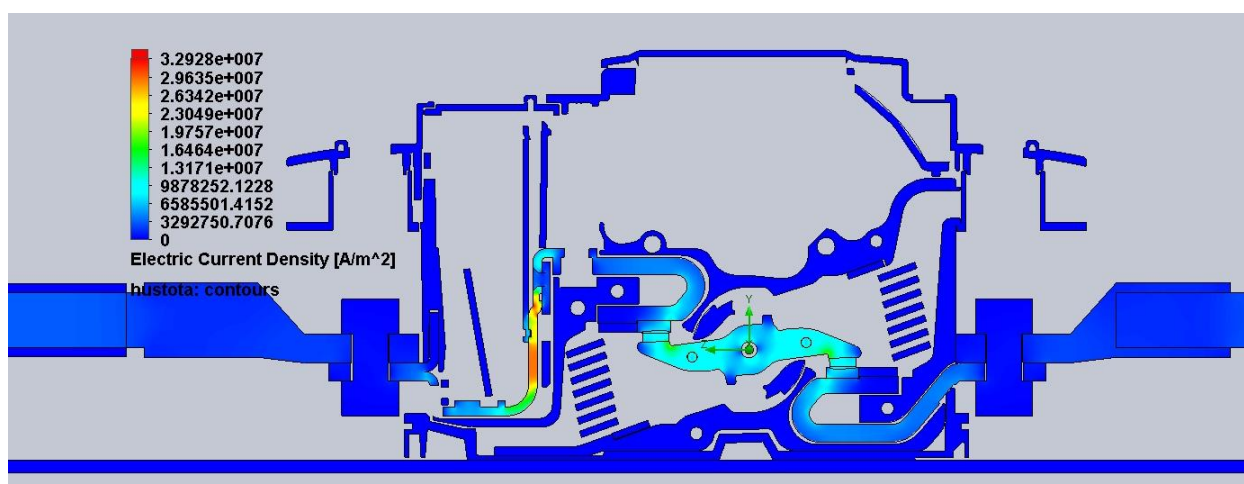
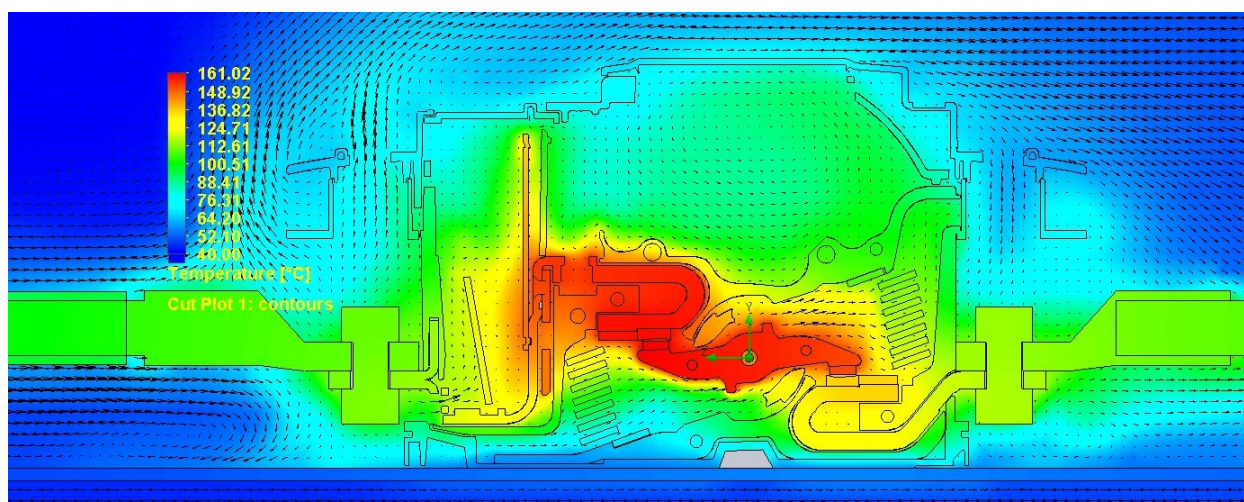
Ustálený stav - simulace $0,7 \times I_n$



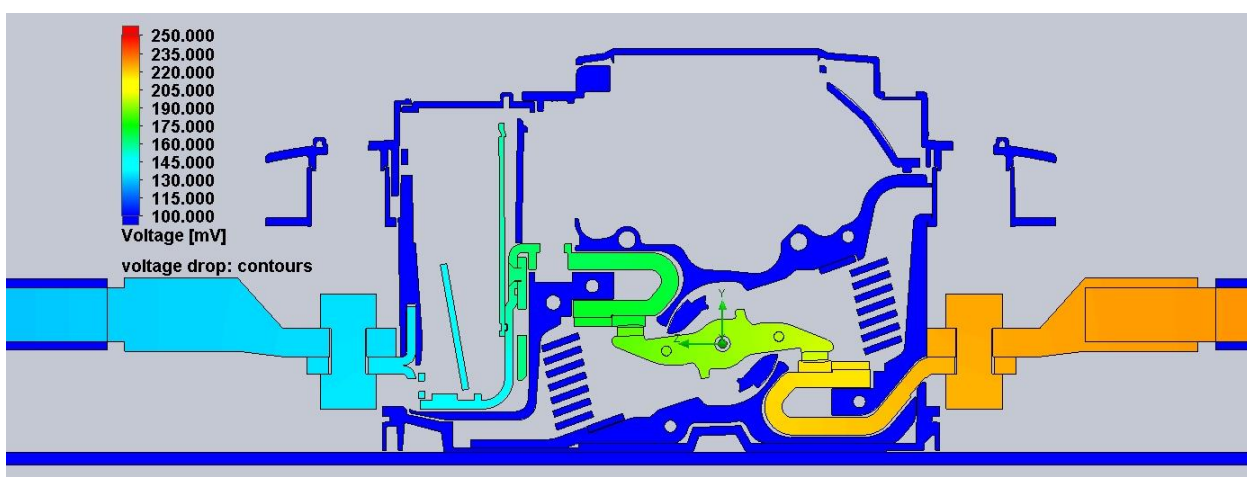
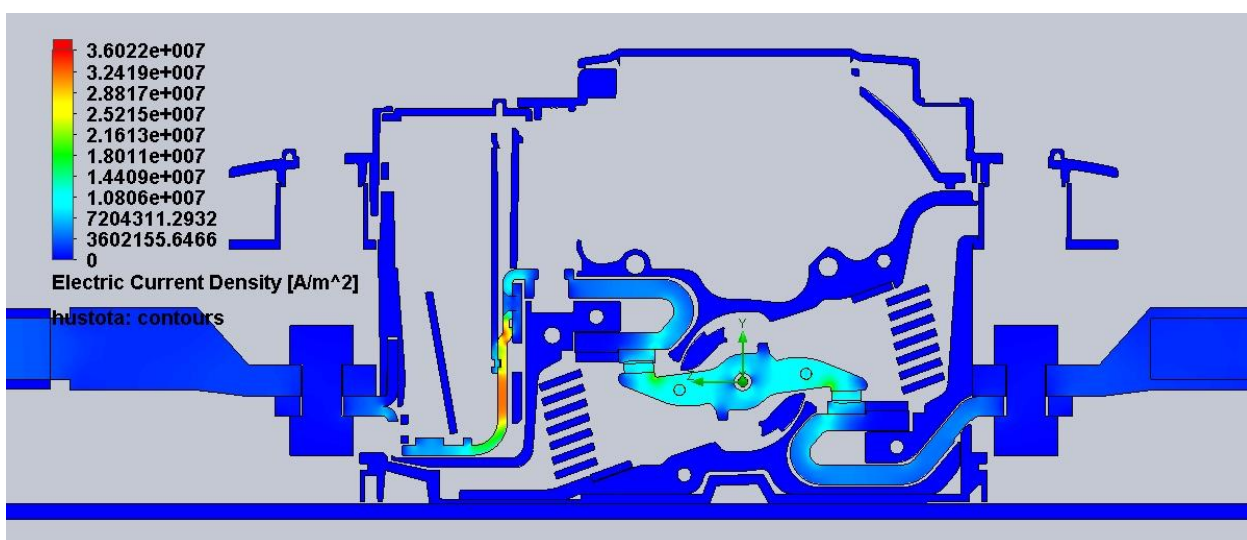
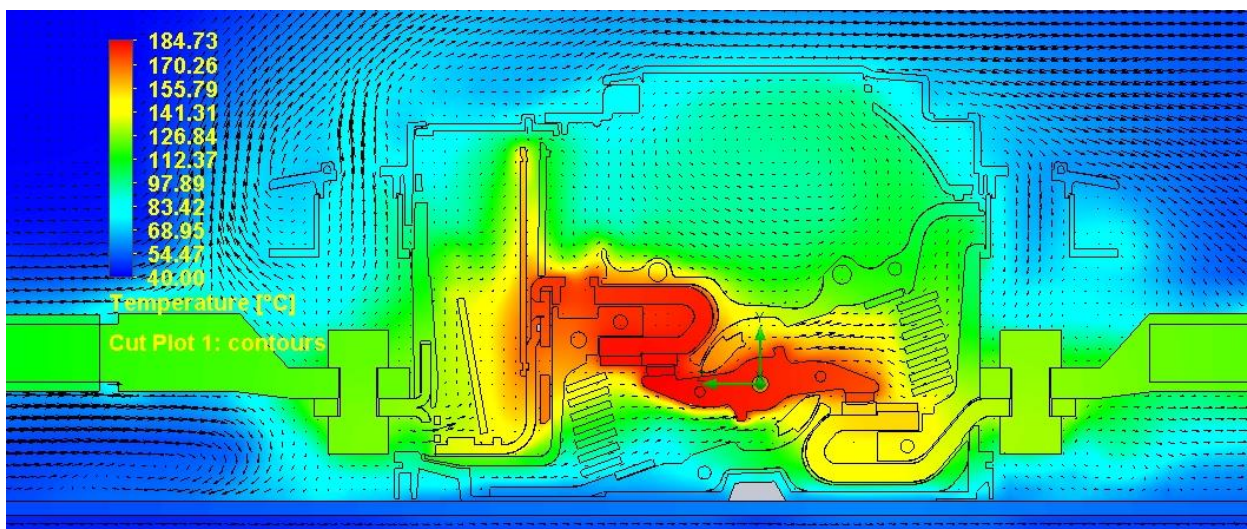
Ustálený stav - simulace $0,8 \times I_n$



Ustálený stav - simulace 1,18×In

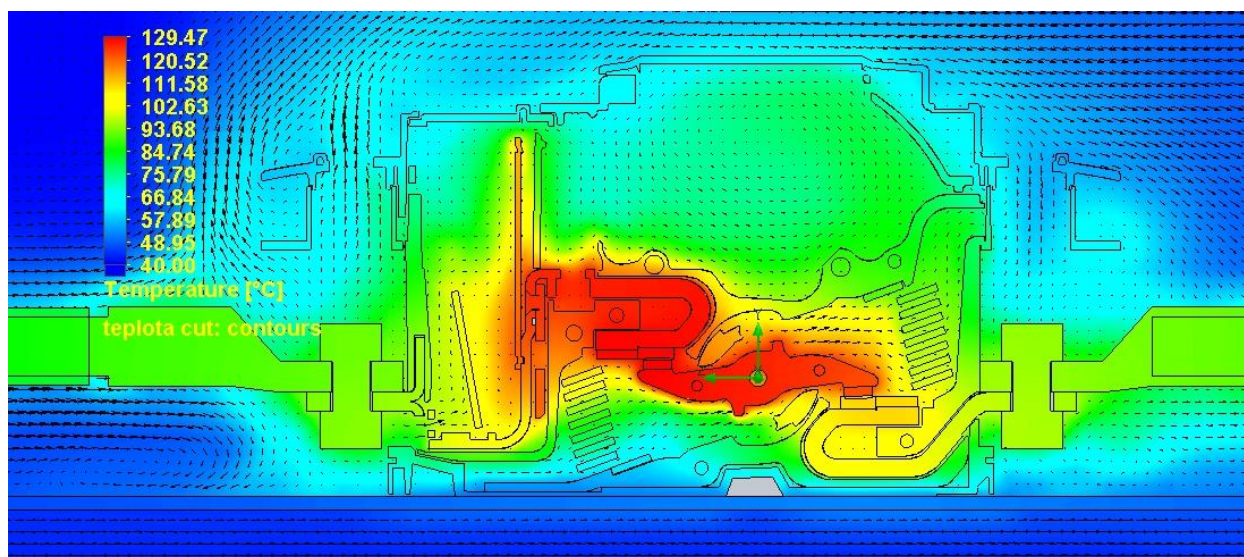


Ustálený stav - simulace 1,3×In

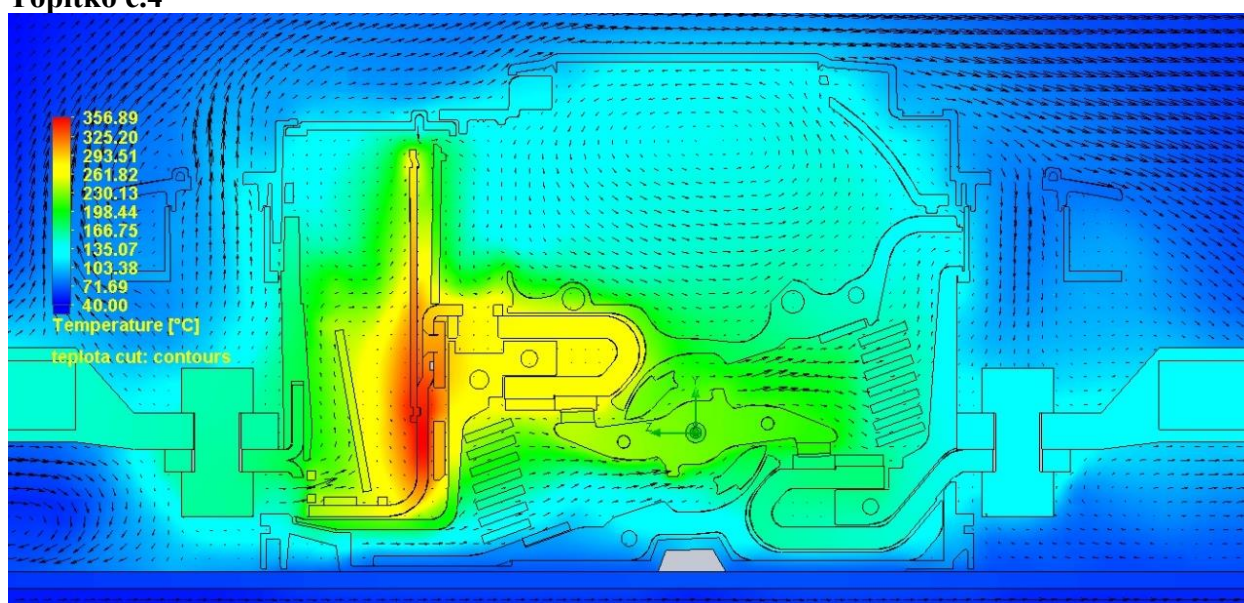


Ustálený stav - simulace 1,0×In – záměna topítka

Topítko č. 2

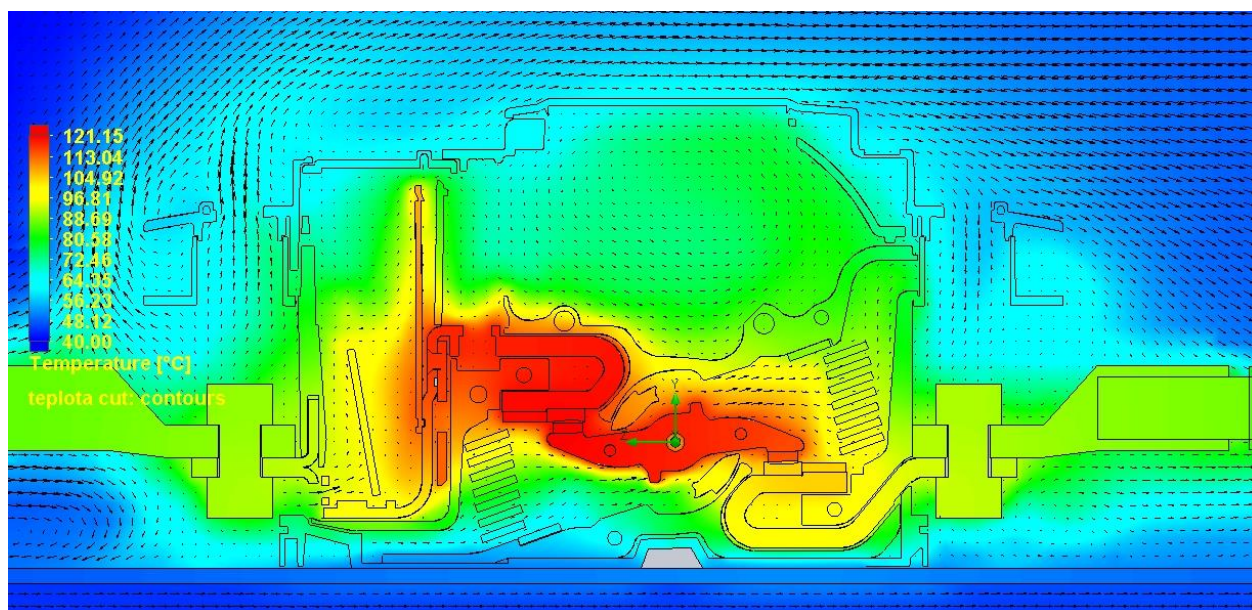


Topítko č.4

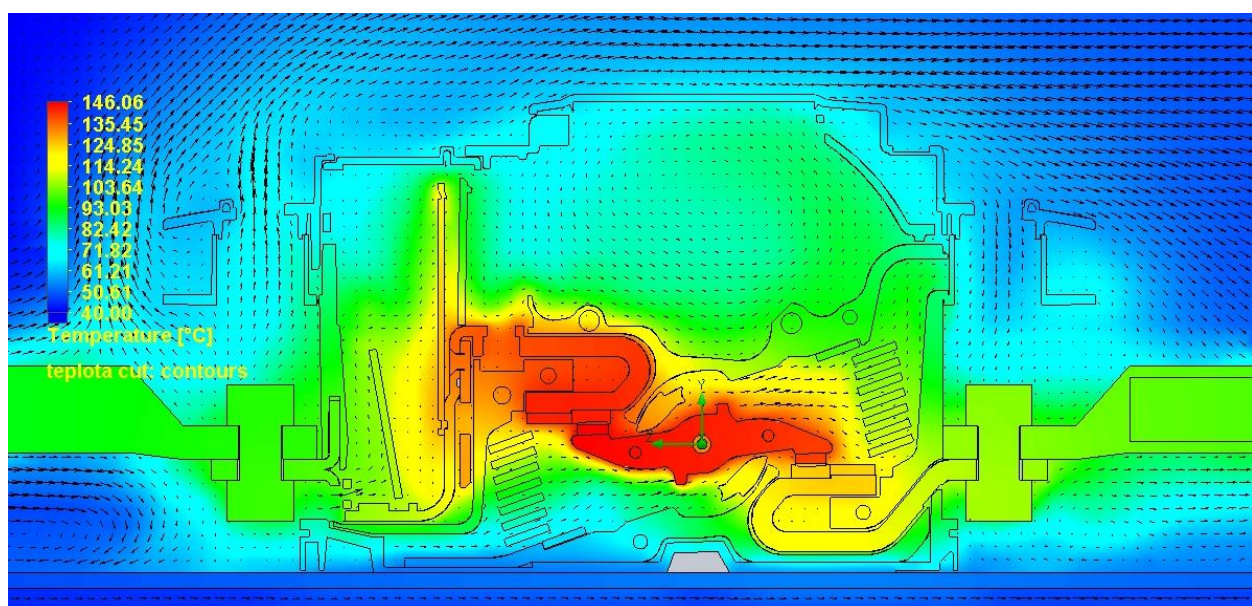


Ustálený stav - simulace různého přechodového odporu silových kontaktů

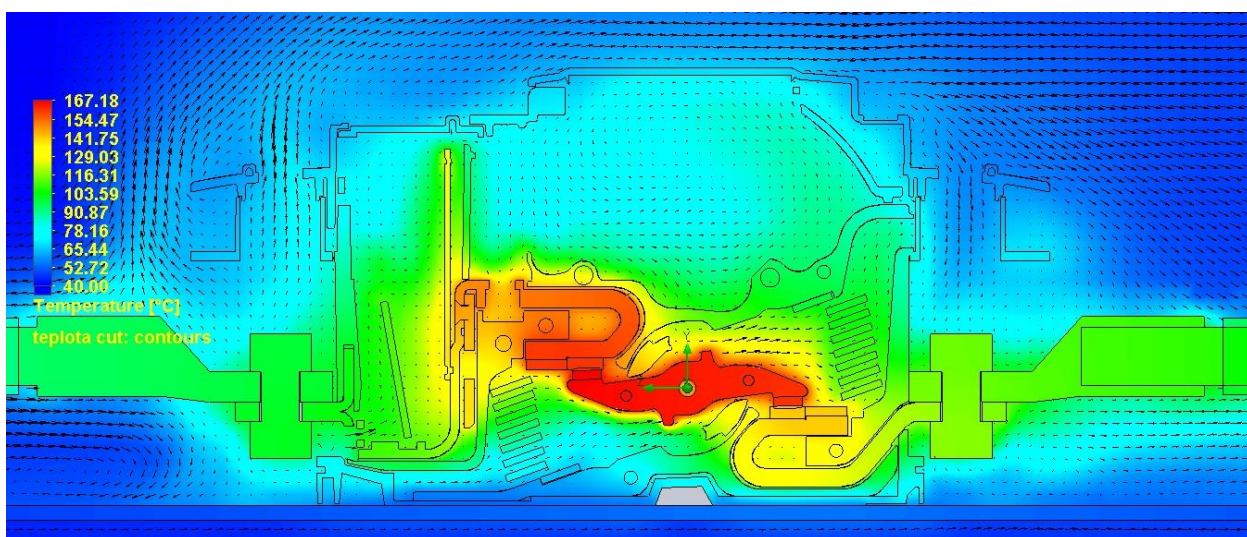
Přechodový elektrický odpor 80%



Přechodový elektrický odpor 150%

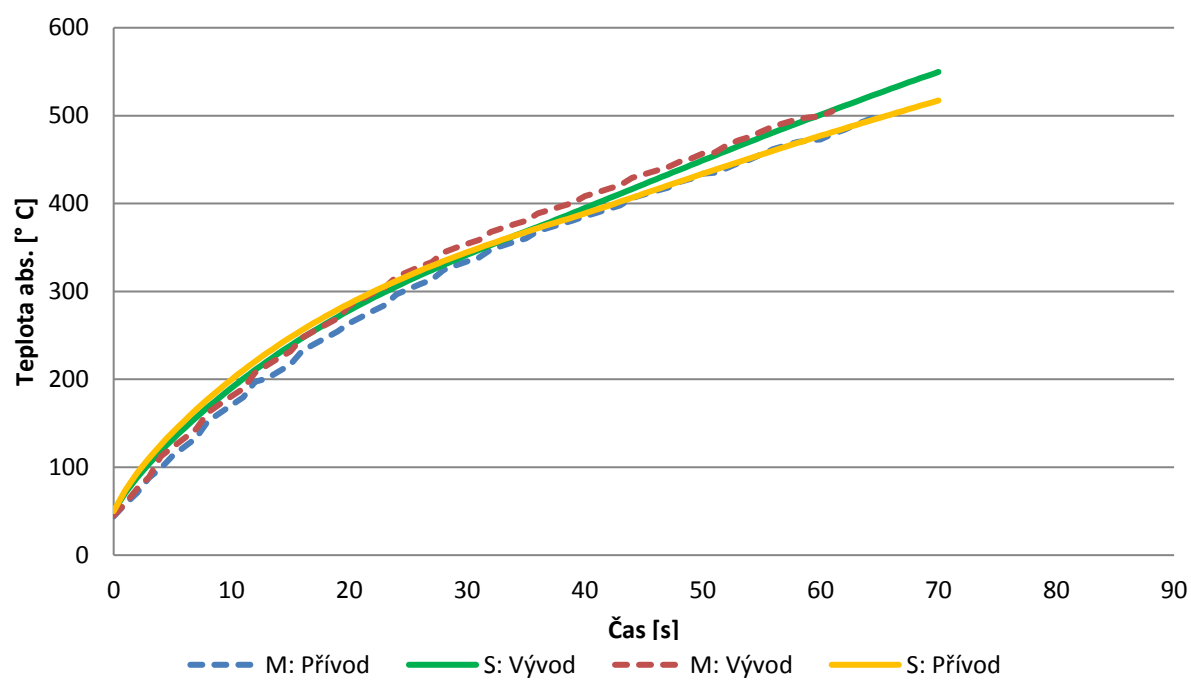


Přechodový elektrický odpor 300%

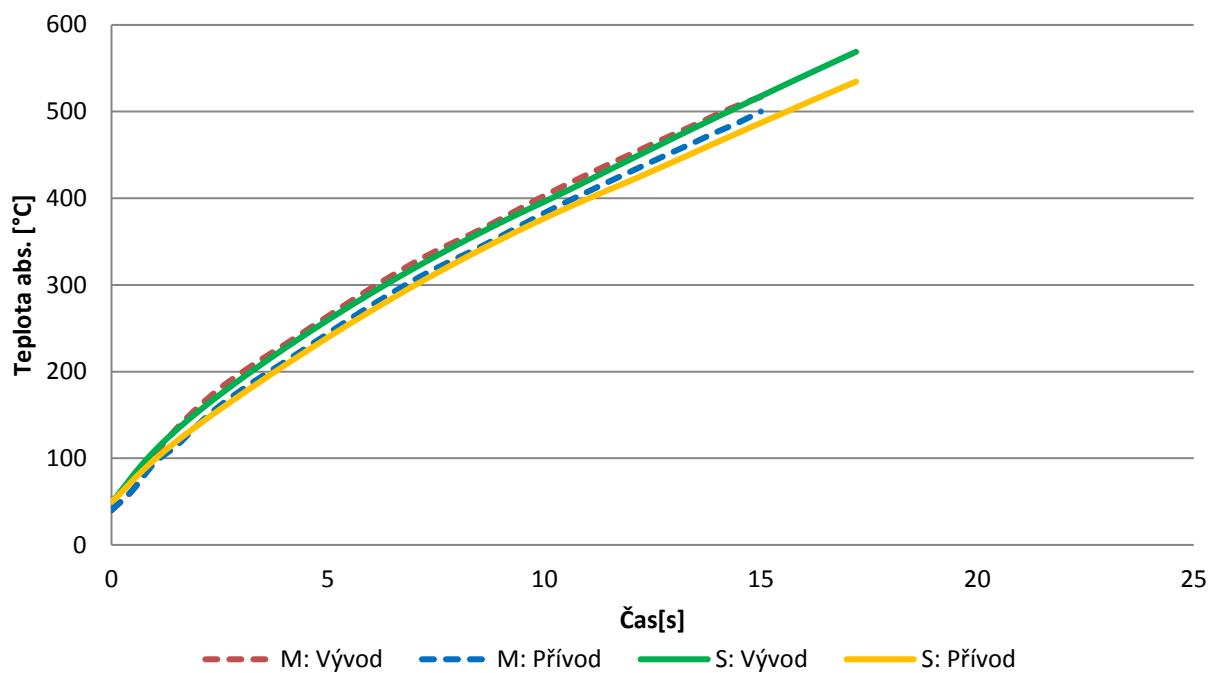


Přetížení – porovnání simulace s fyzickým měřením při 4× - 12× In

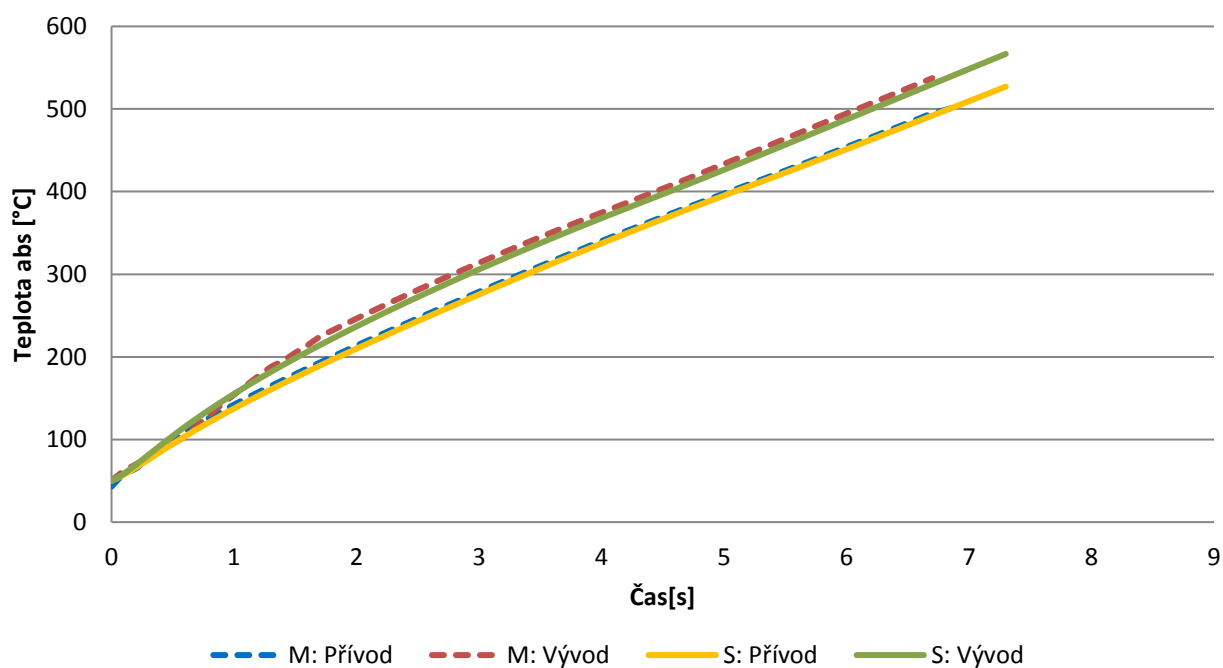
S & M; 4xIn teplotní profil pohyblivého kontaktu - přetížení - L2



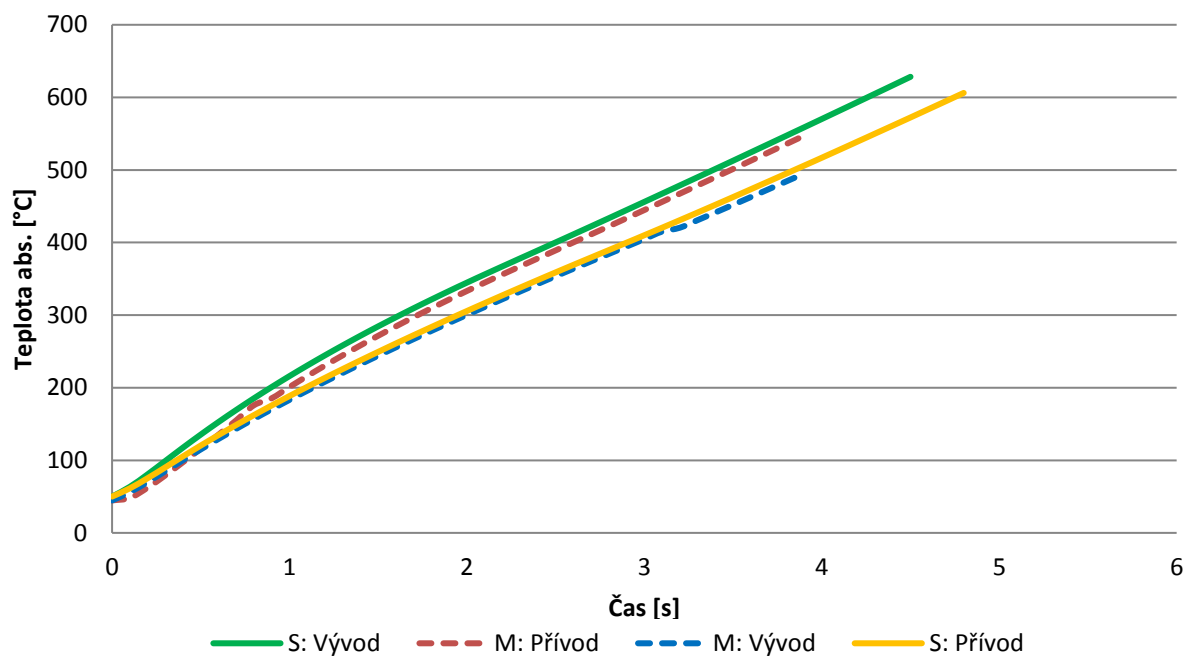
S & M; 6xln teplotní profil pohyblivého kontaktu - přetížení - L2



S & M; 8xln teplotní profil pohyblivého kontaktu - přetížení - L2



S & M; 10xln teplotní profil pohyblivého kontaktu - přetížení - L2



S & M; 12xln teplotní profil pohyblivého kontaktu - přetížení - L2

